Iranian Food Science and Technology
Research Journal
Homepage: https://ifstrj.um.ac.ir

Research Article
Vol. 21, No. 5, Nov.-Dec. 2025, p. 477-496

Effect of Surfactant Type on the Properties of Peanut Oil-based Oleogels and Their Functionality in Butter Cake

S.M. Najibi Hosseini[1], B. Ghanbarzadeh[1*]
1- Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
(*- Corresponding Author Email: ghanbarzadeh@tabrizu.ac.ir)

Received:	03.06.2025	**How to cite this article:**
Revised:	18.07.2025	Najibi Hosseini, S.M., & Ghanbarzadeh, B. (2025). Effect of surfactant type on the properties of peanut oil-based oleogels and their functionality in butter cake. *Iranian Food Science and Technology Research Journal, 21*(5), 477-496. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2025.93859.1442
Accepted:	21.07.2025	
Available Online:	16.11.2025	

Introduction

Growing public awareness regarding the link between diet and chronic diseases is driving a significant demand for healthier food formulations. The high content of saturated and trans fatty acids in many bakery products is a major cause of cardiovascular disease, type 2 diabetes, and obesity. Consequently, the World Health Organization (WHO) recommends replacing fats like butter and shortening with vegetable oils rich in unsaturated fatty acids. This presents a major challenge for the food industry, as solid fats play a key role in creating desirable sensory properties like texture and mouthfeel, and their direct replacement with liquid oils leads to a significant decline in product quality. Oleogels, formed by creating a three-dimensional network of oleogelators within vegetable oils, have been proposed as a structured alternative to solid fats. Numerous studies have successfully demonstrated the potential of oleogels as fat replacers in various bakery products. For instance, beeswax-based oleogels have been shown to improve the nutritional profile of cakes without compromising quality attributes. However, most research has focused on wax-based oleogels. There is a scarcity of studies that systematically investigate and compare the performance of low-HLB emulsifiers (such as monoglyceride, polyglycerol ester, and Span 60) used alone for the complete replacement of butter in a cake formulation. Furthermore, butter has technological limitations, including a poor ability to trap and stabilize air bubbles, which can affect cake volume and texture. Therefore, this study aimed to investigate oleogels using monoglyceride, polyglycerol ester, and Span 60 emulsifiers in cold-pressed peanut oil (an oil chosen for its excellent nutritional profile) and evaluate their potential as a functional and healthy butter replacement in butter cake.

Materials and Methods

In this research, peanut oil was first extracted using a cold-press machine. Oleogels were then prepared by adding 12% (w/w) of monoglyceride (MG), polyglycerol ester (PG), and Span 60 (SG) to the oil, followed by placing it in a 75°C water bath. The physicochemical properties of the oleogels including crystal morphology (light microscopy), oil holding capacity (OHC) via centrifugation, thermal behavior (Differential Scanning Calorimetry - DSC), firmness (back extrusion test), molecular structure (Fourier Transform Infrared Spectroscopy - FTIR), and oxidative stability (peroxide value) were evaluated. Finally, butter cakes were prepared with complete replacement of butter by the selected oleogels (MG and PG). The cakes were then analyzed for firmness and sensory evaluation (color, taste, texture, and overall acceptability).

Results and Discussion

The type of oleogelator significantly impacted the oleogel properties, an effect dictated by the underlying crystal microstructure. Microscopic images revealed that the MG formed a dense, uniform network with fine, needle-like crystals. In contrast, PG also formed needle-like crystals, but they were larger and less dense, while SG created a weak network containing large, rosette-like crystals and significant spaces. This structural difference was directly reflected in the macroscopic properties. The dense network of MG was highly effective at trapping oil, resulting in the highest Oil Holding Capacity (100%) and the greatest firmness. Conversely, the sparse network

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2025.93859.1442

of SG resulted in poor oil retention and minimal firmness, demonstrating a clear structure-function relationship. Thermal analysis by DSC further supported these findings. MG showed the highest thermal stability, evidenced by its high melting enthalpy, which corresponds to the energy required to disrupt its well-ordered crystalline network. FTIR analysis confirmed that the network was stabilized by non-covalent interactions, such as hydrogen bonds and van der Waals forces. Furthermore, the oleogels demonstrated improved oxidative stability. The strong physical barrier provided by MG and PG networks showed that the rate of peroxide value increased over 30 days compared to pure oil. In the cake evaluation, samples formulated with MG and PG had significantly softer texture than the control cake made with butter. This is attributed to the enhanced air-holding capacity of the firmer oleogels and the inherent emulsifying properties of the gelators. Crucially, the sensory analysis revealed that the cakes containing oleogel scored higher texture and taste value, and their overall acceptability score was equal to or even higher than that the control sample.

Conclusion

The findings demonstrated that the oleogelator type dictated the physicochemical and structural properties of oleogels. The monoglyceride-based oleogel exhibited superior performance, showing the highest oil holding capacity, thermal stability, and firmness, followed by the polyglycerol ester-based oleogel. Microstructural analysis confirmed that these properties were linked to the crystal morphology, .FTIR analysis verified that gelation was driven by non-covalent interactions. Most importantly, when monoglyceride and polyglycerol ester oleogels used as a complete butter substitute in butter cakes, produced cakes with a softer texture and received overall acceptability scores equal to or higher than the control. Therefore, this study confirms the high potential of monoglyceride and polyglycerol ester-based oleogels to develop healthier bakery products. Despite promising results, the study had limitations, including the use of a single oil type and one oleogelator concentration. Textural and sensory analyses could also be more comprehensive. Further research need to focus on evaluating these oleogels in other bakery products, investigating long-term stability, and optimizing the production process.

Keywords: Oleogel, Monoglyceride, Peanut oil, Polyglycerol ester, Span 60

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
https://ifstrj.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۲۱، شماره ۵، آذر- دی ۱٤۰٤، ص. ٤۹٦-٤۷۷

بررسی اثر نوع سورفاکتانت در تولید اولئوژل بر پایه‌ی روغن بادام‌زمینی برای کاربرد در کیک کره‌ای

سیدمحمد نجیبی حسینی[۱]- بابک قنبرزاده[۱*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

چکیده

چربی‌ها، با وجود نقش مهم در ایجاد بافت و طعم مطلوب در فرآورده‌های نانوایی، به‌دلیل محتوای بالای اسیدهای چرب اشباع و ترانس، یک نگرانی عمده برای سلامتی مصرف‌کنندگان محسوب می‌شوند. دراین‌راستا، اولئوژل‌ها به‌عنوان یک راه‌حل نوین برای ارائه‌ی جایگزین‌های چربی سالم مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مطالعه با هدف تولید و ارزیابی اولئوژل‌های روغن بادام‌زمینی پرس سرد و کاربرد آن‌ها در کیک کره‌ای انجام شد. ابتدا، روغن بادام‌زمینی پرس سرد تهیه شد و سپس با افزودن ۱۲ درصد از امولسیفایرهای مونوگلیسرید، پلی‌گلیسرول‌استر و اسپن ۶۰ اولئوژل‌ها به‌دست آمدند. بررسی‌های طیف‌سنجی مادون قرمز یک کاهش شدت باند موجود در بازه‌ی ۳۱۱۰ تا ۳۶۷۴ Cm^{-1} را که مربوط به پیوند هیدروژنی بود، نشان دادند. به‌علاوه، باندهای ۲۸۵۰ Cm^{-1} و ۲۹۱۹ Cm^{-1} در اولئوژلاتورها به ۲۸۵۵ Cm^{-1} و ۲۹۲۵ Cm^{-1} در اولئوژل‌ها منتقل شدند که به وجود برهم‌کنش‌های واندروالسی نسبت داده شد. تصاویر میکروسکوپ نوری نیز حاکی از این بود که کریستال‌های اولئوژل‌های مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول‌استر سوزنی‌شکل و کریستال‌های اسپن ۶۰ شعاعی کم‌تراکم (رزت‌مانند) بودند. ظرفیت نگهداری روغن برای اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید ۱۰۰ درصد بود و اولئوژل‌های بر پایه‌ی پلی گلیسرول‌استر (۹۷/۹۸ درصد) و اسپن ۶۰ (۷۳/۴۸ درصد) در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین، اولئوژل‌ها در مقایسه با روغن خالص، افزایش آهسته‌تری در عدد پراکسید در طی ۳۰ روز، از خود نشان دادند. با مقایسه‌ی دمای پیک و آنتالپی ذوب، اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید (با دمای پیک ذوب ۵۷/۶۲ °C و آنتالپی ۳۶۸ $j.g^{-1}$-)، بالاترین پایداری حرارتی را به نمایش گذاشت و همچنین در آزمون اکستروژن معکوس، سفت‌ترین نمونه شناخته شد. در نهایت، کیک‌های کره‌ای تولیدشده با این اولئوژل‌ها بافت نرم‌تر و امتیاز پذیرش کلی برابر یا حتی بالاتری نسبت به نمونه‌ی شاهد داشتند. این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که اولئوژل‌های بر پایه‌ی مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول‌استر پتانسیل بالایی برای جایگزینی کامل کره در فرمولاسیون کیک‌های کره‌ای دارند.

واژه‌های کلیدی: اسپن ۶۰، اولئوژل، پلی‌گلیسرول‌استر، روغن بادام‌زمینی، مونوگلیسرید

مقدمه

امروزه با افزایش آگاهی عمومی نسبت به ارتباط میان رژیم غذایی و بیماری‌های مزمن، تقاضا برای غذاهای سالم‌تر به‌طور چشمگیری در حال افزایش است (Lee, 2018). چربی‌های حاوی اسیدهای چرب اشباع و ترانس یکی از اجزای ناسالم فرمولاسیون برخی محصولات غذایی هستند و مصرف زیاد آن‌ها، به‌عنوان یکی از دلایل اصلی بیماری‌های قلبی-عروقی، دیابت نوع دو، چاقی و اختلالات متابولیکی شناخته می‌شود (Silva, Ferdaus, Foguel, & da Silva, 2023). درهمین‌راستا، سازمان بهداشت جهانی[۲] (WHO) توصیه می‌کند که مصرف اسیدهای چرب اشباع به کمتر از ۱۰ درصد کل انرژی دریافتی روزانه محدود شود و چربی‌هایی مانند کره و شورتنینگ با روغن‌های گیاهی سرشار از اسیدهای چرب غیر اشباع جایگزین گردند (Su *et al.*, 2023). علی‌رغم توصیه‌های بهداشتی، چربی‌ها نقش کلیدی و غیر

۱- گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
(*- نویسنده‌ی مسئول: Email: ghanbarzadeh@tabrizu.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2025.93859.1442
2- World health organization (WHO)

قابل انکاری در ایجاد خواص حسی[1] مطلوب مانند بافت، طعم و احساس دهانی در بسیاری از محصولات غذایی، ایفا می‌کنند (Badem & Baştürk, 2023) و استفاده‌ی مستقیم از روغن‌های گیاهی در فرمولاسیون محصولات غذایی، موجب افت کیفیت محصول نهایی می‌شود (Su *et al*., 2023).

برای حل این مشکلات، در سال‌های اخیر، سیستم‌های جامد لیپیدی بر پایه‌ی روغن‌های گیاهی به‌منظور استفاده در محصولات غذایی مطرح شده‌اند (Jang, Bae, Hwang, Lee, & Lee, 2015). این سیستم‌ها که اولئوژل نامیده می‌شوند، با تشکیل شبکه‌ی سه‌بعدی توسط اولئوژلاتورها در روغن‌های گیاهی به‌دست می‌آیند (Demirkesen & Mert, 2020). اولئوژل‌ها، با ارائه‌ی خواص رئولوژیکی و فیزیکی مشابه با چربی‌ها به‌عنوان جایگزین ایده‌آل آن‌ها عمل می‌کنند. اولئوژلاتورها را می‌توان به دو دسته‌ی با وزن مولکولی پایین (موم، اسیدهای چرب، فیتوسترول و الکل‌های چرب) و با وزن مولکولی بالا (پروتئین و پلی‌ساکارید) تقسیم کرد (Wang, Chandrapala, Truong, & Farahnaky, 2023). مونوگلیسرید، پلی‌گلیسرول‌استر و اسپن ۶۰ هر سه امولسیفایرهای با HLB[2] پایین هستند که در دسته‌بندی اولئوژلاتورهای با وزن مولکولی پایین قرار می‌گیرند. از روغن‌های گیاهی مختلفی مانند روغن بادام‌زمینی می‌توان برای تولید اولئوژل‌ها استفاده کرد. بادام‌زمینی یک دانه‌ی روغنی است که ۴۷ تا ۵۰ درصد روغن دارد (Dun *et al*., 2019). بااین‌حال، عامل اصلی ایجاد حساسیت، پروتئین بادام زمینی است؛ نه روغن آن (Bublin & Breiteneder, 2014). روغن بادام‌زمینی سرشار از ویتامین E است و حدود ۸۰ درصد از اسیدهای چرب آن را اسیدهای چرب غیراشباع به‌ویژه اسید اولئیک و لینولئیک تشکیل می‌دهند. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که مصرف دانه یا روغن بادام‌زمینی بر بهبود بیماری‌های قلبی-عروقی و دیابت نوع ۲ تأثیر مثبتی داشته و موجب پیشگیری از ابتلا به تصلب شرایین می‌شود؛ همچنین ممکن است موجب کاهش خطر ابتلا به سرطان روده‌ی بزرگ شود (Dun *et al*., 2019). از چربی‌هایی مانند کره، شورتنینگ و مارگارین در تولید فرآورده‌های نانوایی مانند کیک‌ها استفاده می‌شود. از انواع کیک‌ها می توان کیک کره‌ای را نام برد که نوعی کیک پوند[3] بوده و در آن، کره به‌عنوان یکی از اجزای اصلی فرمولاسیون، نقش چربی را ایفا می‌کند (Nguyen Doan Mai *et al*., 2023). پژوهش‌های متعددی پتانسیل استفاده از اولئوژل‌ها را به‌عنوان جایگزین چربی در محصولات نانوایی مانند مافین (Giacomozzi, Carrín, & Palla, 2018)، کوکی (Zulfiqar *et al*., 2024) و کیک (Badem & Baştürk, 2023) با موفقیت نشان داده‌اند؛ مطالعه‌ی آمواه و همکاران (Amoah, Lim, Jeong, & Lee, 2017) ثابت کرد که کیک فرموله‌شده با اولئوژل‌های بر پایه‌ی موم زنبور عسل در مقایسه با شورتنینگ، ضمن حفظ ویژگی‌های کیفی، پروفایل تغذیه‌ای آن را بهبود می‌دهد. در مطالعه‌ی دیگری مالوانو و همکاران (Malvano, Laudisio, Albanese, d’Amore, & Marra, 2022) با جایگزینی کامل کره در کیک اسفنجی توسط یک مخلوط بهینه شامل اولئوژل موم زنبور عسل (۷۷ درصد)، امولسیفایر (۷ درصد) و پروتئین آب پنیر (۱۶ درصد)، محصولی با بافت مطلوب‌تر (نرم و مرطوب) تولید کردند. همچنین گیاکوموزی و همکاران (Giacomozzi, Carrín, & Palla, 2023) با تمرکز بر آزمون ارزیابی حسی برای مافین‌های تهیه‌شده از اولئوژل‌های بر پایه‌ی مونوگلیسرید، گزارش دادند که جایگزینی کامل مارگارین با اولئوژل منجر به محصولی با پروفایل تغذیه‌ای سالم‌تر و ویژگی‌های حسی مشابه یا حتی بهتر می‌شود.

بااین‌حال اغلب پژوهش‌ها بر استفاده از اولئوژلاتورهایی مانند موم‌ها متمرکز بوده‌اند و مطالعات اندکی به بررسی و مقایسه‌ی عملکرد امولسیفایرهایی مانند مونوگلیسرید، پلی‌گلیسرول‌استر و اسپن ۶۰ به تنهایی، به‌عنوان جایگزین کامل کره در کیک پرداخته‌اند. ازسوی‌دیگر علاوه‌بر چالش سلامتی، کره از لحاظ تکنولوژیکی نیز دارای محدودیت است؛ به‌طوری‌که توانایی پایینی در به‌دام‌انداختن و پایدارسازی حباب‌های هوا دارد و ممکن است در تولید کیک کره‌ای برای ارائه‌ی کیفیت مطلوب از نظر حجم و بافت، به اضافه کردن امولسیفایر نیاز داشته باشد (Pancharoen, Leelawat, & Vattanakul, 2019). بنابراین هدف از این پژوهش بررسی پتانسیل اولئوژل‌های بر پایه‌ی امولسیفایر، به‌عنوان جایگزینی سالم‌تر و با خواص تکنولوژیکی برتر برای کره در فرمولاسیون کیک کره‌ای بود. به‌این‌ترتیب ابتدا با استفاده از مونوگلیسرید، پلی‌گلیسرول‌استر و اسپن ۶۰ در روغن بادام‌زمینی پرس سرد، اولئوژل‌ها تولید شده و سپس، مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. در مرحله‌ی بعد اولئوژل‌های منتخب به‌عنوان جایگزین کامل کره در فرمولاسیون کیک کره‌ای استفاده شده و فراورده‌های نهایی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده

مونوگلیسرید، پلی‌گلیسرول‌استر، اسپن ۶۰، پتاسیم یدید و نشاسته از شرکت مرک (آلمان) و کلروفرم، تیوسولفات آمونیوم و اسید استیک

1- Organoleptic properties
2- Hydrophilic-lipophilic balance
3- Pound cake

از شرکت مجللی (ایران) خریداری شدند. بادام‌زمینی و مواد فرمولاسیون کیک نیز از بازار محلی تبریز تأمین گردید.

استخراج روغن بادام‌زمینی

ابتدا بادام‌زمینی‌ها به روش دستی به‌طور کامل پوست‌گیری شدند. سپس برای استخراج روغن آن‌ها، دستگاه روغن‌گیر خانگی (مدل OPM450 – HOME PRO) مورد استفاده قرار گرفت. دمای روغن خروجی حدود ۵۰ تا ۶۰ °C بود. در مرحله‌ی بعد روغن استخراج‌شده برای حذف ناخالصی‌ها، به‌مدت ۳۰ دقیقه با ۴۰۰۰ rpm سانتریفیوژ شد و در نهایت روغن شفاف به‌دست‌آمده، تا زمان تولید اولئوژل‌ها در یخچال نگهداری شد (Yin *et al*., 2022).

آزمون‌های اولئوژل

آماده‌سازی اولئوژل‌ها

ابتدا، غلظت‌های ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد وزنی، طبق مطالعات پیشین برای هر سه اولئوژلاتور بررسی شد. مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول‌استر در هر سه غلظت ژل تشکیل دادند، اما اسپن ۶۰ در هیچ‌یک از این غلظت‌ها ژل ایجاد نکرد. ازآنجایی‌که هدف، مقایسه‌ی مستقیم سه اولئوژلاتور بود، لازم بود غلظتی پیدا شود که حتی ضعیف‌ترین نمونه (اسپن ۶۰) نیز در آن ژل تشکیل دهد. بنابراین، با بررسی غلظت‌های بالاتر برای اسپن ۶۰، مشخص شد که این ماده در غلظت ۱۲ درصد وزنی ژل تشکیل می‌دهد. در نهایت، به‌منظور فراهم آوردن شرایط یکسان و مقایسه‌پذیر، غلظت ۱۲ درصد وزنی برای هر سه اولئوژلاتور در این پژوهش انتخاب گردید. به‌این‌ترتیب مونوگلیسرید، پلی‌گلیسرول استر و اسپن۶۰، هر کدام با این غلظت به روغن پرس سرد بادام‌زمینی اضافه شدند. سپس در حمام آب ۷۵ °C به مدت ۱۰ دقیقه تحت هم‌زدن قرار گرفتند. در نهایت هر کدام از نمونه‌ها به‌منظور تشکیل ژل، ۹۰ دقیقه در دمای محیط نگهداری شده و سپس به یخچال انتقال یافتند. پس از طی کردن ۲۴ ساعت در یخچال، برای انجام آزمون‌ها مورد استفاده قرار گرفتند (Sun *et al*., 2022). اسامی MG، PG و SG به‌ترتیب برای اولئوژل‌های بر پایه‌ی مونوگلیسرید، پلی‌گلیسرول-استر و اسپن۶۰ انتخاب شد.

بررسی ریزساختار

ریزساختار اولئوژل‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری مجهز به دوربین (صا ایران، مدل BM180N)، مورد مطالعه قرار گرفت. به‌این ترتیب چند قطره از اولئوژل‌ها روی لام ریخته شده و پس از قرار دادن لامل، به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۵ °C نگهداری شدند. در انتها، از اولئوژل‌ها با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰ برابر در دمای اتاق عکس‌برداری شد و مورد بررسی قرار گرفتند (Malvano, Albanese, Cinquanta, Liparoti, & Marra, 2024).

ظرفیت نگهداری روغن[1] (OHC)

برای بررسی ظرفیت نگهداری روغن اولئوژل‌ها، روش منگ و همکاران (Meng, Wang, Lu, Yu, & Ye, 2024)، با اندکی تغییر مورد استفاده قرار گرفت؛ به‌این‌ترتیب ۱ گرم از هر نمونه در یک میکروتیوب ۲ میلی‌لیتری ریخته و با استفاده از سانتریفیوژ برند Vision مدل VS-180CFI، به‌مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰۰ rpm در دمای ۲۵ °C سانتریفیوژ شد. پس از حذف روغن جداشده از هر نمونه توسط کاغذ صافی، مقادیر OHC با استفاده از معادله‌ی (۱) محاسبه گردید که در آن M_1، M_2 و M_3، به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی وزن میکروتیوب خالی، وزن میکروتیوب به‌همراه نمونه قبل از سانتریفیوژ و وزن میکروتیوب به‌همراه نمونه بعد از برداشتن روغن بود.

$$\%OHC = [1 - \frac{(M_2 - M_3)}{(M_2 - M_1)}] \times 100 \qquad (۱)$$

بررسی رفتار حرارتی

رفتار حرارتی اولئوژل‌ها مشابه روش هوانگ و همکاران (Hwang, Kim, Winkler- Moser, Lee, & Liu, 2022) با گرماسنجی پویشی تفاضلی[2] (DSC) مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌این‌منظور از دستگاه Sanaf DSC-400 (ساخت ایران) استفاده شد. بعد از رسیدن نمونه‌ها به دمای محیط، ۱۵ میلی‌گرم از هر نمونه با سرعت $^\circ C.min^{-1}$ ۱۰ از ۲۵ تا ۱۰۰ °C حرارت داده شد. در انتها نقاط پیک ذوب و آنتالپی به‌دست‌آمده توسط نرم‌افزار خود دستگاه، برای هر نمونه مورد بررسی قرار گرفت.

ارزیابی سفتی

برای ارزیابی سفتی اولئوژل‌ها، آزمون اکستروژن معکوس[3] توسط دستگاه Sanaf Tensile Tester-SUT 2.5N و روش پینهاس و همکاران (Davidovich-Pinhas, Barbut, & Marangoni, 2015) با اندکی تغییر مورد استفاده قرار گرفت؛ به‌طوری‌که نمونه‌ها به قالب‌ها (۳۰mm قطر، ۲۰ mm ارتفاع) ریخته شده و پس از نگهداری ۲۴ ساعته در یخچال، تا رسیدن به دمای ۲۵ °C در محیط نگهداری شدند. سپس توسط یک پروب به قطر ۲۵ mm و با سرعت $mm.s^{-1}$ ۰/۵ آزمون انجام گردید. اعمال فشار تا کاهش ۵۰ درصدی ارتفاع اولیه‌ی

1- Oil holding capacity
2- Differential scanning calorimetry
3- Back extrusion

نمونه‌ها ادامه یافت و نقطه‌ی اوج نمودار نیرو-جابه‌جایی هر نمونه به‌عنوان معیار سفتی در نظر گرفته شد.

طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)

با استفاده از یک طیف‌سنج مادون قرمز تبدیل فوریه‌ی مدل Bruker Tensor 27، طیف‌ها در بازه‌ی ۴۰۰ cm^{-1} تا ۴۰۰۰ با دقت ۰/۱cm^{-1} ثبت شده و مورد ارزیابی قرار گرفتند (Liu, Pei, Shen, Xu, & Zhao, 2024).

عدد پراکسید[1] (PV)

روش اسید استیک-کلروفرم (AOCS Cd 8-53) برای اندازه‌گیری مقادیر پراکسید نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا، برای جداسازی روغن، از حلال هگزان استفاده گردید و سپس فاز روغن جداشده با اسید استیک و کلروفرم (با نسبت ۳ به ۲) ترکیب و در ادامه یدید پتاسیم اشباع به آن اضافه شد. پس از نگهداری محلول حاصل به‌مدت ۱ دقیقه در جای تاریک، آب و معرف نشاسته به آن اضافه شده و با تیوسولفات سدیم (۰/۰۱ N) تیتر گردید. عدد پراکسید هر نمونه توسط معادله‌ی (۲) به دست آمد که در آن S، حجم تیوسولفات سدیم مصرفی برای تیتر محلول دارای نمونه، B، حجم تیوسولفات سدیم مصرفی برای شاهد، W، وزن نمونه و N، نرمالیته‌ی تیوسولفات سدیم بود (Güneşer, Yılmaz, & Ok, 2017).

$$PV = \frac{(S-B)\times N\times 1000}{W} \quad (۲)$$

روش تهیه‌ی کیک کره‌ای

مقادیر مواد استفاده‌شده برای فرمولاسیون کیک‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. از اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ به‌دلیل عدم برخورداری از سفتی و ظرفیت نگهداری روغن مطلوب، استفاده نشد. برای تولید کیک‌های کره‌ای روش انگ و همکاران (Ang, Abdullah, Muhammad, & Lizardo, 2017) با اعمال تغییراتی مورد استفاده قرار گرفت. به‌این‌ترتیب ابتدا شکر و کره (یا اولئوژل‌ها) که به دمای محیط رسیده بودند، توسط همزن برقی با دور متوسط، مخلوط شدند تا بافتی سبک به‌دست آید. سپس وانیل و تخم‌مرغ به‌تدریج اضافه شدند. پس از رسیدن به مخلوط یکنواخت توسط همزن و اضافه‌شدن شیر همزنی با دور آهسته، ادامه یافت. در مرحله‌ی بعد آرد، بیکینگ پودر و نمک الک‌شده، به‌تدریج و با همزدن آهسته، به مخلوط کیک اضافه شدند. سپس وزن یکسانی از خمیر به قالب‌ها ریخته شده و در فر از پیش گرم‌شده در دمای ۱۶۵ °C قرار گرفتند. همه‌ی کیک‌ها بعد از ۲۰ دقیقه از فر خارج شده و پس از رسیدن به دمای محیط (به‌مدت یک ساعت) برای انجام آزمون‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. کیک‌های کره‌ای تهیه‌شده با کره، اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید (MG) و اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر (PG)، به‌ترتیب Control، MGBC، PGBC نام‌گذاری شدند.

[1] 1- Peroxide value

آزمون‌های کیک کره‌ای

ارزیابی سفتی

این آزمون با اعمال تغییراتی در روش فنگ و همکاران (Feng *et al.*, 2025) انجام شد. به‌این‌ترتیب سفتی نمونه‌ها توسط پروب استوانه‌ای با قطر ۴۵ mm و با سرعت ۱ $mm.s^{-1}$ مورد ارزیابی قرار گرفت. کیک‌ها در اندازه‌های یکسان (ارتفاع ۲۳ mm و قطر ۳۰ mm) آماده‌سازی شدند، سپس تا ۷۵ درصد ارتفاع اولیه‌ی خود فشرده شدند. از حداکثر نیروی ثبت‌شده در منحنی نیرو-جابه‌جایی برای تحلیل سفتی بافت کیک‌های کره‌ای استفاده شد.

ارزیابی حسی هدونیک

یک پنل متشکل از ۱۵ ارزیاب نیمه‌آموزش‌دیده، ویژگی‌های حسی کیک را ارزیابی کردند. کیک‌ها در اندازه‌های یکسان و به‌طور تصادفی سرو شدند و پس از هر نمونه از آب آشامیدنی برای شستشوی دهان استفاده گردید. در این ارزیابی، شاخص‌هایی نظیر رنگ، بافت، طعم و پذیرش کلی با استفاده از یک مقیاس ۵ نقطه‌ای سنجیده شد که در آن امتیاز ۱، به معنای کمترین علاقه و امتیاز ۵، به معنای بیشترین علاقه بود (Yılmaz & Öz, 2024).

آنالیز آماری

در این پژوهش از طرح کاملا تصادفی با سه تکرار در آزمون‌ها استفاده شد و میانگین با استفاده از آنالیز واریانس یک طرفه (One Way ANOVA) در سطح ۵ درصد با استفاده از روش آزمون دانکن در نرم‌افزار SPSS27 محاسبه گردید.

نتایج و بحث

بررسی ریزساختار

شکل ظاهری اولئوژل‌ها در شکل 1D قابل مشاهده است. هر سه اولئوژل توانایی حفظ ساختار خود را پس از وارونه کردن داشتند. خواص فیزیکی اولئوژل‌ها تا حد زیادی تحت تأثیر اندازه و شکل کریستال‌ها قرار می‌گیرد (Dominguez, Carrin, & Palla, 2024). اندازه و شکل کریستال‌ها نیز به عواملی مانند نوع، خلوص و غلظت اولئوژلاتور، نوع روغن، شرایط تولید (مانند سرعت خنک‌سازی) و وجود سایر افزودنی‌ها بستگی دارد (Uslu & Yılmaz, 2021).

جدول ۱- فرمولاسیون کیک‌های کره‌ای

Table 1- Formulations of butter cakes

نمونه Sample	MG (g)	PG (g)	کره (g) Butter	تخم‌مرغ Egg (g)	شکر Sugar (g)	آرد Flour (g)	شیر Milk (g)	وانیل Vanil (g)	بیکینگ پودر Baking Powder (g)	نمک Salt (g)
Control	-	-	45	50	60	82.5	35	1	1.5	0.5
MGBC	45	-	-	50	60	82.5	35	1	1.5	0.5
PGBC	-	45	-	50	60	82.5	35	1	1.5	0.5

بنابراین برای مقایسه‌ی کریستال‌های تشکیل‌شده توسط اولئوژلاتورهای مونوگلیسرید، پلی‌گلیسرول‌استر و اسپن ۶۰ این آزمون انجام شد. طبق شکل ۱ ریزساختار هر سه اولئوژل متفاوت بود که می توان آن را به زنجیره‌ی هیدروکربنی بلند آن‌ها که توانایی تشکیل شبکه‌های کریستالی گوناگون دارد، نسبت داد (Ghan, Siow, Tan, Cheong, & Thoo, 2020). اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید یک شبکه‌ی فیبری متراکم، با توزیع یکنواخت و متشکل از کریستال‌های سوزنی‌شکل ریز را نشان داد (شکل ۱A) که ناشی از خودآرایی مونوگلیسریدها در روغن و تشکیل یک فاز معکوس با ساختار لایه‌ای بود (Palla, Dominguez, & Carrín, 2022). دیماکوپولو-پاپازوگلو و همکاران (Dimakopoulou-Papazoglou, Giannakaki, & Katsanidis, 2023) نیز در مطالعه‌ی خود وجود کریستال‌های سوزنی شکل ریز را برای اولئوژل بر پایه‌ی روغن کنجد و مونوگلیسرید گزارش کردند. با وجود اینکه اوانش و همکاران (Uvanesh *et al.*, 2016) اسپن ۶۰ را به‌عنوان اصلاح‌کننده‌ی شبکه‌ی کریستالی در اولئوژل بر پایه‌ی استئاریک اسید معرفی کردند، طبق شکل 1C زمانی‌که از اسپن ۶۰ به‌تنهایی استفاده شد، کریستال‌های شعاعی[1] بزرگ با فضاهای خالی زیاد مشاهده شد که مشابه با تصاویر اولئوژل‌های مطالعه‌ی بهارا و همکاران (Behera, Patil, Sagiri, Pal, & Ray, 2012) بود و می توان این ساختار را به سر حجیم سوربیتان در اسپن ۶۰ نسبت داد که معمولا یک شبکه‌ی ژلی ضعیف ایجاد می‌کند. همچنین، اولئوژل مورد مطالعه‌ی سان و همکاران (Sun *et al.*, 2022) که بر پایه‌ی مونوگلیسرید بود کریستال‌های شعاعی نشان داد. درحالی‌که غان و همکاران (Ghan *et al.*, 2020) گزارش دادند که با افزایش درصد اسپن ۶۰ در اولئوژل‌های مورد مطالعه‌ی خود، کریستال‌های سوزنی و میله‌ای به‌وجود می‌آیند. مطابق با شکل 1B کریستال‌های سوزنی‌شکل اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر، علی‌رغم داشتن تراکم خوب نسبت به اسپن ۶۰ نسبت به مونوگلیسرید بزرگ‌تر بودند که بر خلاف یافته های بوییتیمئا-کانتوئا و همکاران (Buitimea-Cantúa *et al.*, 2022) بود؛ به‌طوری‌که اولئوژل مورد مطالعه‌ی آن‌ها که بر پایه‌ی پلی گلیسرول‌استر بود، کریستال‌های کروی‌شکل[2] نشان داد. در مقابل منگ و همکاران (Meng, Guo, Wang, & Liu, 2019) که در مطالعه‌ی خود از پلی‌گلیسرول‌استر به‌عنوان اولئوژلاتور در روغن آفتاب‌گردان استفاده کرده بودند، با استفاده از میکروسکوپ نور پلاریزه[3] (PLM) کریستال‌های سوزنی‌شکل مشاهده کردند. تفاوت کریستال‌های اولئوژل‌های مورد مطالعه با منابع مختلف ممکن است به وجود ترکیبات کم‌مقدار در روغن پرس سرد بادام‌زمینی مربوط باشند که باعث ایجاد تغییر در قطبیت روغن شده و روی برهم‌کنش‌های بین روغن و اولئوژلاتور تأثیر می‌گذارند (Dominguez *et al.*, 2024) به‌طور کلی می‌توان گفت کریستال‌های سوزنی‌شکل به‌دلیل تشکیل شبکه‌ی کریستالی که به خوبی در هم تنیده می‌شوند (Li, Guo, Bi, Zhang, & Xu, 2021) و همچنین توزیع متراکم‌تر کریستال‌ها تأثیر مثبتی بر خواص ماکروسکوپی سیستم‌ها دارد (Meng *et al.*, 2019).

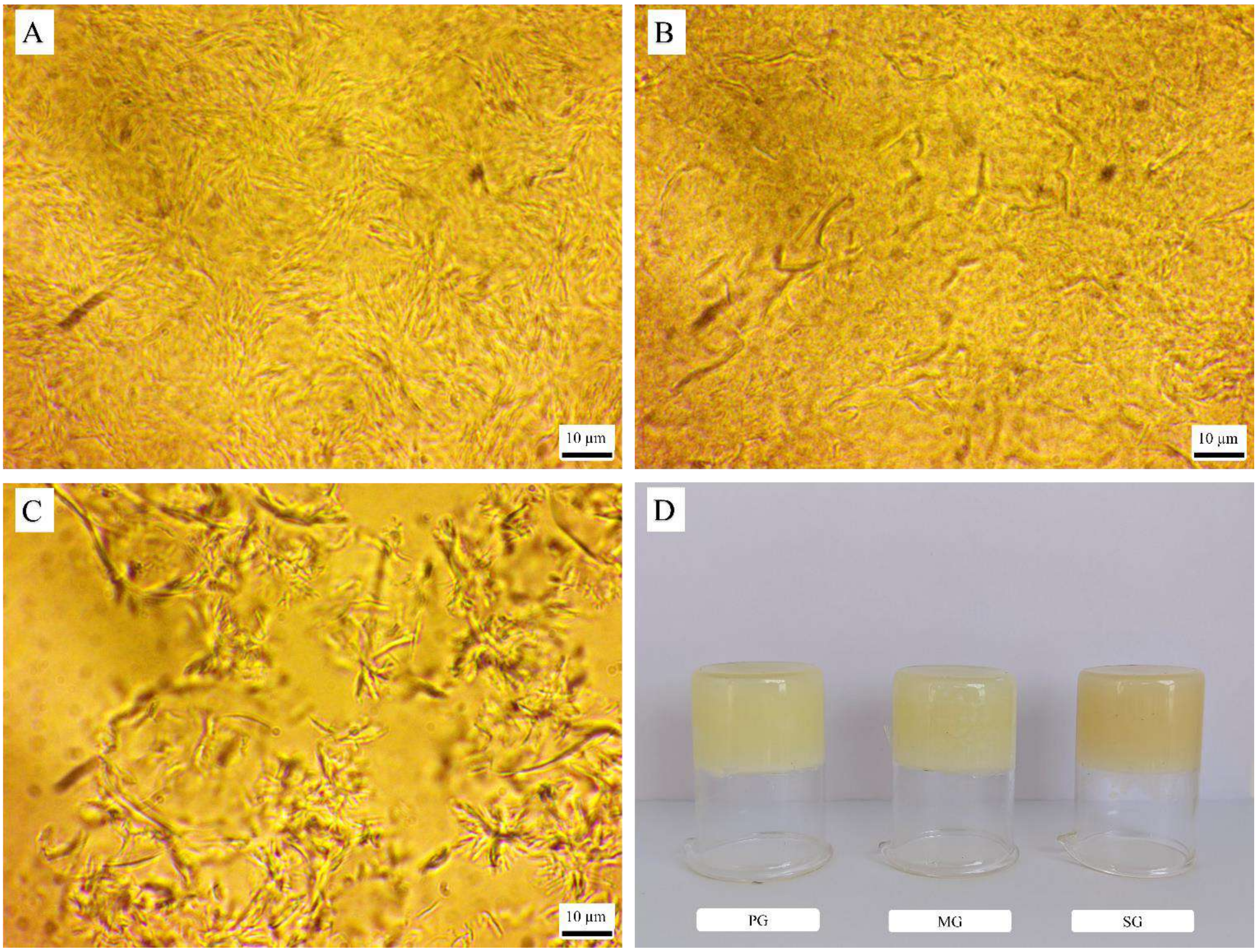
ظرفیت نگهداری روغن

ظرفیت نگهداری روغن یکی از ویژگی‌های مهم است که برای بررسی پایداری فیزیکی اولئوژل‌ها استفاده می‌شود و نشان‌دهنده‌ی توانایی شبکه‌ی ژلی برای حفظ فاز مایع است (Hafiz *et al.*, 2025). OHC پایین، منجر به آزاد شدن روغن در سیستم غذایی شده و در نتیجه باعث افت کیفیت بافتی و حسی آن می‌شود (Arrieira *et al.*, 2025). نمودار درصد ظرفیت نگهداری روغن در شکل ۲ ارائه شده است. طبق شکل هر سه اولئوژل با یکدیگر تفاوت معنی‌دار داشتند ($p<0.05$) که می‌تواند ناشی از تفاوت در اندازه، شکل، توزیع و نظم فضایی کریستال‌ها باشد (Zhang, Xu, Tang, & Li, 2023)؛ به‌طوری‌که اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید بالاترین درصد OHC (۱۰۰ درصد) را نشان داد که به‌دلیل شبکه‌ی سه‌بعدی متراکم و پایدار تشکیل‌شده توسط کریستال‌های ریز سوزنی‌شکل آن بود (Li *et al.*, 2021).

1- Rosette-like

2- Spherulitic

3- Polarized light microscopy



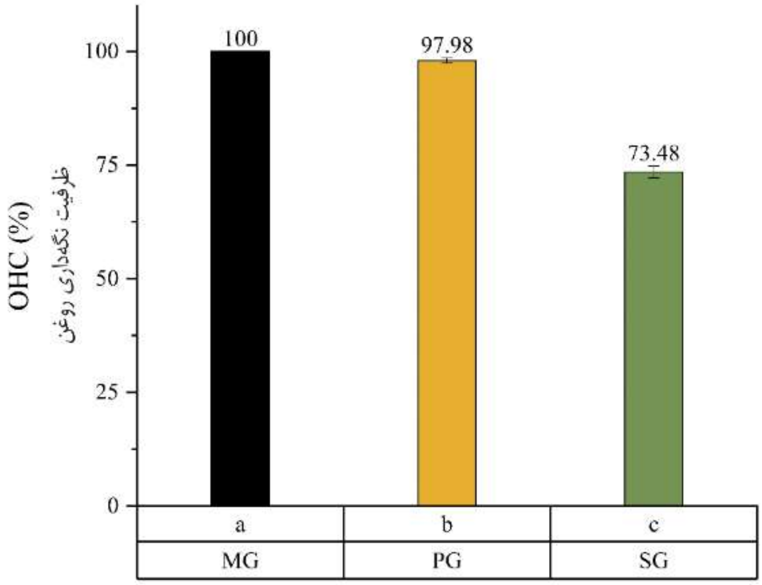
شکل ۱- تصاویر میکروسکوپی (A, B, C) و شکل ظاهری (D) اولئوژل‌ها

اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید (MG، A)، اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر (PG، B)، اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ (SG، C)

Fig. 1. Microscopic images (A, B, C) and visual appearance (D) of oleogels

Monoglyceride-based oleogel (MG, A), Polyglycerol ester-based oleogel (PG, B), Span 60-based oleogel (SG, C)

درحالی‌که با توجه به شکل ۲، اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر علی‌رغم داشتن ساختاری متراکم، کریستال‌های بزرگتری نسبت به اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید داشت و ظرفیت نگهداری روغن پایین‌تر (۹۷/۹۸ درصد) را می‌توان به همین نسبت داد. این یافته‌ها مشابه نتایج مطالعات پیشین بود؛ دومینگوئز و همکاران (Dominguez *et al.*, 2024) در پژوهش خود اولئوژل‌هایی با غلظت ۶ و ۱۰ درصد مونوگلیسرید در ۵ نوع روغن تولید کردند و OHC همه‌ی آن‌ها را بالاتر از ۹۳ درصد گزارش دادند. همچنین، در مطالعه‌ی یلماز و اوسلو (Yilmaz & Uslu, 2020) تمام نمونه‌های اولئوژل برپایه‌ی مونو و پلی‌گلیسرول استئارات مقادیر OHC بالاتر از ۹۹ درصد را نشان دادند. مطابق با شکل ۲ پایین‌ترین درصد OHC متعلق به اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ بود (۷۳/۴۸ درصد) که می‌توان به وجود فضاهای خالی بیشتر و اندازه‌ی بزرگ کریستال‌های آن طبق تصاویر میکروسکوپی نسبت داد (Barroso, Okuro, Cerqueira, & Cunha, 2024). غان و همکاران (Ghan *et al.*, 2020)، ظرفیت نگهداری روغن سه اولئوژل بر پایه‌ی لسیتین سویا، گلیسرول مونواستئارات و سوربیتان مونواستئارات (اسپن ۶۰) را مورد بررسی قرار دادند و در مطالعه‌ی آن‌ها اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ در همه‌ی غلظت‌ها، پایین‌ترین OHC را نشان داد. به‌طور کلی، کریستال‌های کوچک‌تر به‌دلیل نسبت سطح‌به‌حجم بیشتر و تشکیل مسیر پیچیده‌تر، OHC بالاتری را نشان می‌دهند (Dominguez *et al.*, 2024).



شکل ۲- ظرفیت نگهداری روغن اولئوژل‌ها (٪)

حروف متفاوت نشان‌دهنده‌ی وجود اختلاف معنی‌دار بین داده‌ها است (p<۰/۰۵).

MG: اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید، PG: اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر، SG: اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰

Fig. 2. Oil holding capacity of oleogels (%)

Different letters indicate significant differences between the data (p<0.05).

MG: Monoglyceride-based oleogel, PG: Polyglycerol ester-based oleogel, SG: Span 60-based oleogel

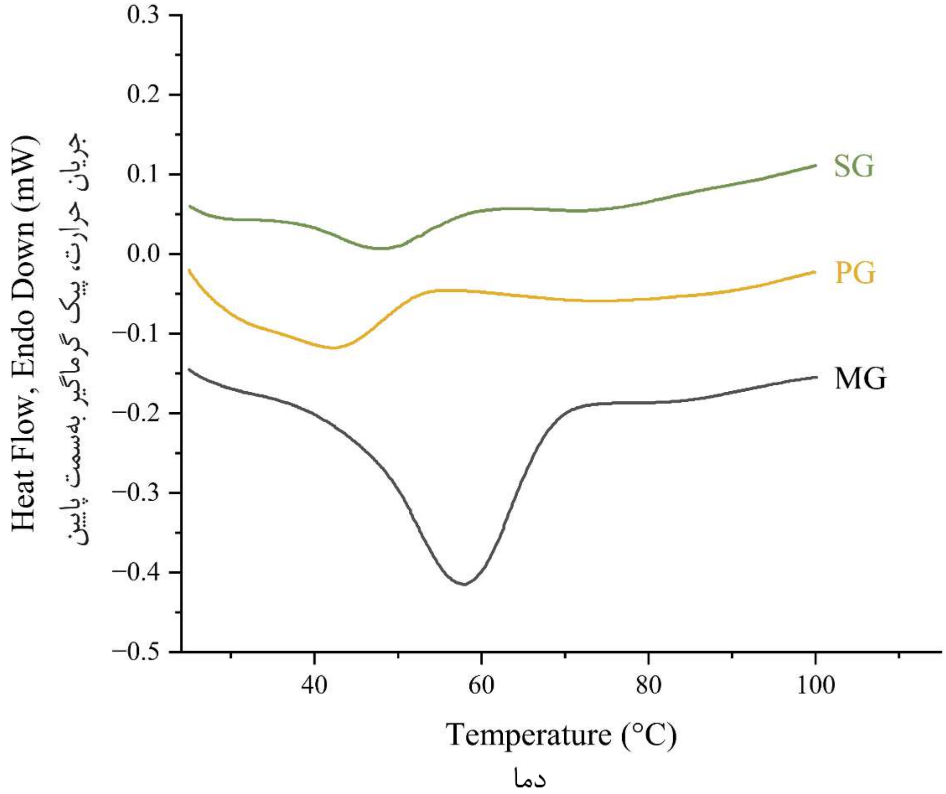
بررسی رفتار حرارتی

مطالعه در مورد رفتار حرارتی اولئوژل‌ها برای ارزیابی خواص فیزیکی آن‌ها ضروری است. DSC یک روش آنالیز حرارتی برای مطالعه‌ی چگونگی تغییر خواص فیزیکی یک نمونه در طول زمان نسبت به دما است (Monto *et al*., 2023). بنابراین، برای بررسی و مقایسه‌ی دمای ذوب و آنتالپی اولئوژل‌ها این آزمون انجام شد. نمودار رفتار حرارتی اولئوژل‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. هر سه اولئوژل یک پیک ذوب نشان دادند که ناشی از ذوب کریستال‌های تشکیل‌شده توسط اولئوژلاتورها بود و با یافته‌های مطالعات منگ و همکاران (Meng *et al*., 2019) برای اولئوژل‌های بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر، پرودرومیدیس و همکاران (Prodromidis, Biliaderis, Katsanidis, & Moschakis, 2023)، برای اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید در مرحله‌ی اول گرمایش (۰ تا ۱۰۰ °C) و سینگ و همکاران (Singh, Pramanik, Ray, & Pal, 2015) برای اولئوژل های تولیدشده از اسپن ۶۰ مطابقت داشت. طبق جدول ۲ دمای پیک هر سه نمونه با یکدیگر اختلاف معنی‌دار داشتند که می‌توان به تفاوت در ترکیب شیمیایی اولئوژلاتورها نسبت داد. اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید بالاترین دمای ذوب (۵۷/۶۲ °C) را داشت که ناشی از ذوب فرم کریستالی آلفا بود (Prodromidis *et al*., 2023). لی و همکاران (Li *et al*., 2021) برای اولئوژل‌های بر پایه‌ی گلیسرول مونواستئارات (MS) و گلیسرول مونوبهنات (MB)، دو پیک گرماگیر مشاهده کردند. آن‌ها پیک اول (۵۵/۵۵ °C در MS و ۶۴/۷۷ °C در MB) برای را به فاز ال-آلفا[1] و پیک دوم (۳۱/۵۸ °C در MS و ۴۸/۶۱ °C در MB) را به تبدیل ال-آلفا به زیر-آلفا[2] نسبت دادند. همچنین اولئوژل بر پایه‌ی گلیسرول مونولورات در مطالعه‌ی ژنگ و همکاران (Zhang *et al*., 2023) فقط یک پیک ذوب در حدود ۴۰ °C نشان داد که ناشی از ذوب فاز ال-آلفا بود. اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر پایین‌ترین دمای ذوب را نشان داد (۴۲/۵۵ °C) که مشابه با دمای مشاهده‌شده در مطالعه‌ی منگ و همکاران (Meng *et al*., 2019) برای اولئوژل‌های بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر بود. به‌علاوه دمای ذوب اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ ۴۸/۵۴ °C بود که با دمای ذوب مشاهده شده در مطالعه‌ی غان و همکاران (Ghan *et al*., 2020) برای اولئوژل بر پایه‌ی ۱۲ درصد اسپن ۶۰ (۴۹/۰۷ °C) مشابه بود. همچنین گائو و همکاران (Gao *et al*., 2022) در اولئوژل حاوی ۱۰ درصد وزنی اسپن ۶۰، دو پیک گرماگیر در ۴۲/۲ °C (پیک ۱) و ۵۵ °C (پیک ۲) مشاهده کردند. آن‌ها پیک ۱ را به ازهم‌گسیختگی خوشه‌های میسلی و پیک ۲ را به تخریب ساختار میسل‌های اسپن ۶۰ نسبت دادند. به‌طور کلی تفاوت در تعداد پیک‌های ذوب اولئوژل‌ها را می‌توان با منبع متفاوت

1- Lα

2- Sub-α

اولئوژلاتور (Swe & Asavapichayont, 2018) و همچنین ترکیبات جزئی متفاوت در روغن‌های مورد استفاده (Dominguez *et al.*, 2024) مرتبط دانست. با توجه به جدول ۲ روند دماهای پیک ذوب اولئوژل‌ها با مقادیر آنتالپی ذوب مطابقت نداشت؛ به‌طوری‌که اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ علی‌رغم داشتن پایین‌ترین آنتالپی ذوب، دمای پیک ذوب بالاتری از اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر داشت که می‌توان به زنجیره‌ی آلیفاتیک طولانی استئاریک اسید موجود در اسپن ۶۰ نسبت داد (de Oliveira *et al*., 2015).



شکل ۳- نمودار رفتار حرارتی اولئوژل‌ها

MG: اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید، PG: اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر، SG: اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰

Fig. 3. Thermal behavior curves (DSC thermograms) of the oleogels

MG: Monoglyceride-based oleogel, PG: Polyglycerol ester-based oleogel, SG: Span 60-based oleogel

همچنین به‌دلیل اینکه آنتالپی ذوب نشان‌دهنده‌ی درجه‌ی کریستالیزاسیون (نسبت نواحی کریستالی به آمورف) است (Giacomozzi, Palla, Carrín, & Martini, 2019)، احتمالا دلیل بالاتر بودن آنتالپی ذوب اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر، بالاتر بودن مقدار نواحی کریستالی آن نسبت به اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ بود. برای تفسیر دقیق‌تر عدم تطابق پیک‌ها و آنتالپی ذوب، می‌توان از آزمون‌های تکمیلی مانند رزونانس مغناطیسی هسته‌ای[1] (NMR) استفاده کرد.

همچنین از آنتالپی ذوب می‌توان در بررسی پایداری حرارتی نمونه ها استفاده کرد (Ghan *et al*., 2020). با توجه به جدول ۲ آنتالپی ذوب برای اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول‌استر به‌ترتیب ۳۶۸– و ۷۹/۳۳– $j.g^{-1}$ بود درحالی‌که اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ پایین‌ترین آنتالپی (۴۲/۳۳– $j.g^{-1}$) را داشت که با یافته‌های بخش بررسی مورفولوژی کریستالی، در یک راستا بود و می‌توان به شبکه‌ی ژلی ضعیف آن نسبت داد (Zhang *et al*., 2023). بنابراین اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید با داشتن تراکم بالایی از کریستال‌های سوزنی‌شکل ریز و در نتیجه، مقدار بالای ماده‌ی کریستالی، بالاترین پایداری حرارتی را داشت. به‌بیانی‌دیگر انرژی زیادی لازم بود تا برهم‌کنش‌های تشکیل دهنده‌ی شبکه‌ی سه‌بعدی از بین بروند (Dominguez *et al*., 2024).

1- Nuclear magnetic resonance

جدول ۲- دمای پیک و آنتالپی ذوب اولئوژل‌های بر پایه‌ی مونوگلیسرید (MG)، پلی‌گلیسرول‌استر (PG)، اسپن ۶۰ (SG)

Table 2- Melting peak temperature and enthalpy of oleogels based on monoglyceride (MG), polyglycerol ester (PG), and Span 60 (SG)

	MG	PG	SG
دمای پیک ذوب Melting peak temperature (°C)	57.62 ± 0.21[a]	42.55 ± 0.39[c]	48.54 ± 0.46[b]
آنتالپی Enthalpy ($j.g^{-1}$)	-368 ± 22[a]	-79.33 ± 15.50[b]	-42.33 ± 10.63[c]

*حروف مختلف نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار بین نمونه‌ها می‌باشد (آزمون دانکن، p<۰/۰۵).

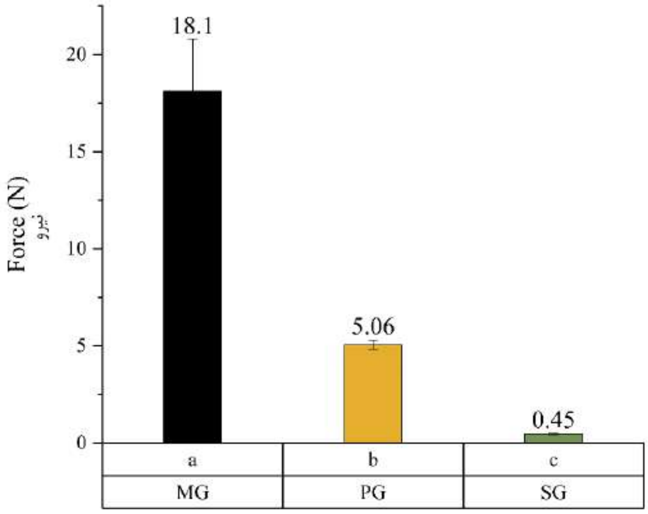
*Different letters indicate significant differences between samples (Duncan's test, p<0.05).

ارزیابی سفتی

سفتی، نشان‌دهنده‌ی استحکام مکانیکی و میزان تراکم شبکه‌ی سه‌بعدی اولئوژل‌ها است و نقش مهمی در بررسی پتانسیل آن‌ها برای کاربردهای عملی ایفا می‌کند (Li *et al.*, 2021). به‌بیان دیگر سفتی یک اولئوژل به مقاومت آن در برابر تغییر شکل تحت نیروی اعمال‌شده اشاره دارد و تحت تأثیر نوع و مقدار اولئوژلاتور مورد استفاده قرار می‌گیرد (Wei *et al.*, 2024). شکل ۴ مقادیر حداکثر نیروی ثبت‌شده را نشان می‌دهد. با توجه به وجود اختلاف معنی‌دار (p<۰/۰۵) در سفتی هر سه اولئوژل، می‌توان نتیجه گرفت نوع اولئوژلاتور تأثیر قابل توجهی بر سفتی سیستم داشت. در سیستم‌های اولئوژل، استحکام مکانیکی ایده‌آل زمانی به‌دست می‌آید که مولکول‌های ژلاتور به‌طور یکنواخت در شبکه‌ی ژلی توزیع شوند (Banerjee *et al.*, 2025). بنابراین، کریستال‌های سوزنی‌شکل ریزتر به‌دلیل داشتن سطح مقطع بیشتر برای ایجاد برهم‌کنش با یکدیگر موجب تشکیل شبکه‌ی سه‌بعدی یکنواخت تر شده و ژل‌های قوی‌تر و سفت‌تری تشکیل می‌دهند (Zhao *et al.*, 2025). همان‌طور که تصاویر میکروسکوپی نشان دادند، اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید ریزترین کریستال‌ها را داشت که موجب داشتن بالاترین میزان سفتی آن شد. وی و همکاران (Wei *et al.*, 2024) نیز در مطالعه‌ی خود، دو اولئوژل بر پایه‌ی موم زنبور عسل و گلیسرول مونولورات را از نظر سفتی مقایسه کردند و اولئوژل بر پایه‌ی موم زنبور عسل را به‌دلیل ساختار کریستالی متراکم و یکنواخت، سفت‌تر گزارش دادند. طبق شکل ۴ اولئوژل‌های بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر با داشتن کریستال‌های بزرگ‌تر از مونوگلیسرید و اسپن ۶۰ با داشتن پایین‌ترین تراکم، در رتبه‌های پایین‌تر سفتی قرار گرفتند، این روند علاوه‌بر مطابقت با تصاویر میکروسکوپی، با درصد ظرفیت نگهداری روغن و مقادیر آنتالپی ذوب اولئوژل‌ها نیز در یک راستا بود. بااین‌حال اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر ضمن داشتن پایین‌ترین دمای پیک ذوب، پایین‌ترین سفتی را نشان نداد که می‌توان گفت طبق مطالعه‌ی فاسولین و همکاران (Fasolin, Cerqueira, Pastrana, Vicente, & Cunha, 2018) دمای ذوب پایین لزوما موجب تولید ژل ضعیف نمی‌شود. به‌طور کلی این یافته‌ها نشان دادند مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول‌استر توانایی تولید اولئوژل‌هایی با استحکام مکانیکی بالاتر نسبت به اسپن ۶۰ داشتند. یافته‌های مشابهی نیز وجود دارند که خواص مکانیکی بهتر اولئوژل‌های بر پایه‌ی گلیسرول را نسبت به اولئوژل‌های بر پایه‌ی سوربیتان گزارش دادند (Cerqueira *et al.*, 2017; Trujillo-Ramírez, Lobato-Calleros, Vernon-Carter, & Alvarez-Ramirez, 2019).

طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه

شکل ۵ طیف‌های اولئوژلاتورها، روغن بادام‌زمینی پرس سرد و اولئوژل‌ها را نشان می‌دهد. طبق شکل 5A طیف‌های هر سه اولئوژلاتور احتمال تشکیل پیوند هیدروژنی را نشان دادند، زیرا یک باند پهن در بازه‌ی ۳۱۱۰ تا ۳۶۷۴ Cm^{-1} وجود داشت که مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های OH موجود در بخش آب‌دوست آن‌ها بود و در روغن وجود نداشت (Ghan, Siow, Tan, Cheong, & Thoo, 2022). مشابه این بازه در (Barroso *et al.*, 2024) برای گلیسرول مونواستئارات و اسپن ۶۰ نیز مشاهده و به کشش گروه OH نسبت داده شد. همچنین برای هر سه اولئوژلاتور باندهایی در ۲۸۵۰ و ۲۹۱۹ Cm^{-1} مشاهده شد که به‌ترتیب مربوط به کشش متقارن CH در CH_3 و CH_2 و کشش نامتقارن CH در CH_2 و CH_3 بود و با مطالعه‌ی غان و همکاران (Ghan *et al.*, 2020) مطابقت داشت. یک باند نسبتاً تیز در ۱۷۴۰، ۱۷۳۷/۵ و ۱۷۳۳/۵ Cm^{-1} به‌ترتیب برای اسپن ۶۰ پلی‌گلیسرول‌استر و مونوگلیسیرید مشاهده شد که به کشش گروه کربونیل (C=O) ارتباط داشت و نشان‌دهنده‌ی وجود پیوندهای استری بود (Sun *et al.*, 2022).



شکل ٤- مقادیر سفتی اولئوژل‌ها

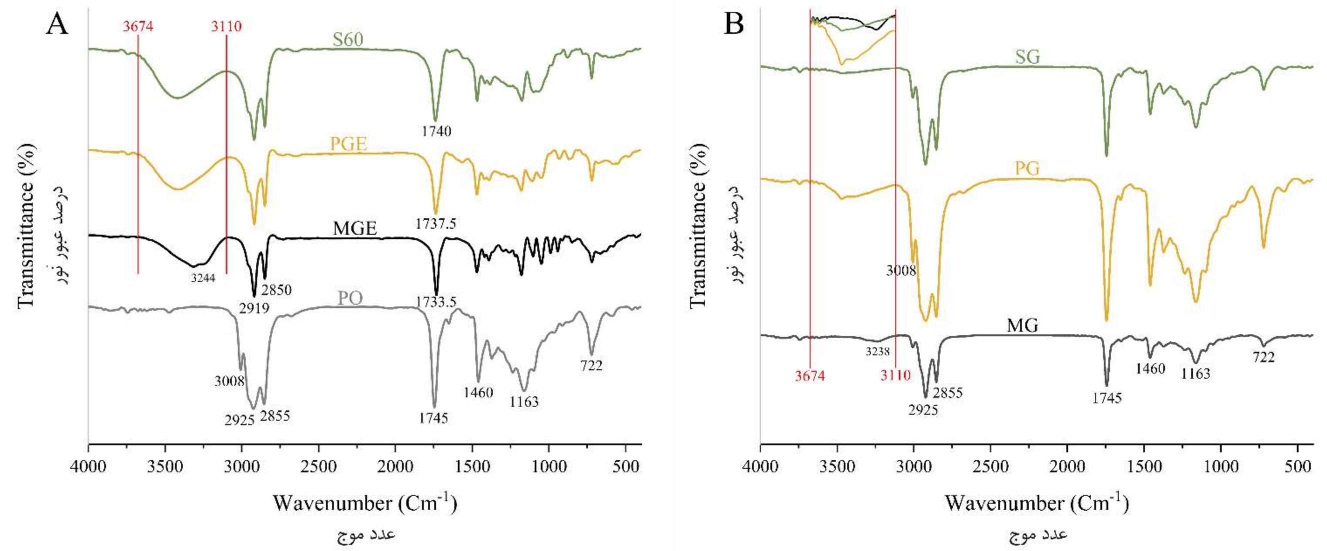
حروف متفاوت نشان‌دهنده‌ی وجود اختلاف معنی‌دار بین داده‌ها است (p<۰/۰۵).

MG: اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید، PG: اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر، SG: اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰

Fig. 4. Firmness values of oleogels

Different letters indicate significant differences between the data (p<0.05).
MG: Monoglyceride-based oleogel, PG: Polyglycerol ester-based oleogel, SG: Span 60-based oleogel

در طیف روغن بادام‌زمینی (شکل 5A) باند کوچک مشاهده‌شده در ۳۰۰۸ Cm^{-1}، مربوط به ارتعاش کششی CH پیوند دوگانه‌ی سیس (CH=) بود که می‌تواند به گروه‌های آسیل اسیدهای چربی مانند اولئیک نسبت داده شود (Bharti *et al.*, 2021)؛ این باند در مطالعه‌ی تروجیلو–رامیرز و همکاران (Trujillo-Ramírez *et al.*, 2019) برای روغن دانه‌ی چیا نیز مشاهده شد. همچنین چهار باند اصلی نشان‌دهنده ی گروه‌های عاملی روغن‌ها، در حدود ۱۴۶۰، ۱۷۴۵، ۲۸۵۵ و Cm^{-1} ۲۹۲۵ مشاهده شد که به‌ترتیب ناشی از ارتعاش خمشی CH در گروه‌های CH_2 و CH_3، کشش C=O و ارتعاش کششی CH در گروه‌های CH_3 و CH_2 بود (Zhao *et al.*, 2025). به‌علاوه، دو باند در ۱۱۶۳ Cm^{-1} (کشش C–O گروه‌های استر) و ۷۲۱ Cm^{-1} (خمش $(CH_2)_n$ در زنجیره‌ی آلکیل) مشاهده شد (Banerjee *et al.*, 2025) که در اولئوژلاتورهای خالص هم وجود داشت. طبق شکل 5B همه‌ی باندهای شناسایی‌شده برای اولئوژلاتورهای خالص و روغن در اولئوژل-ها نیز مشاهده شد و در هیچ‌کدام از اولئوژل‌ها تشکیل یا از بین رفتن باند مشاهده نشد، بااین‌حال چند جابه‌جایی جزئی و همچنین تغییر در شدت باندها مشاهده شد. در هر سه اولئوژل شدت باند پهن در بازه‌ی ۳۱۱۰ تا ۳۶۷۴ Cm^{-1} کاهش یافت که می‌توان این کاهش را به مشارکت پیوند هیدروژنی در تشکیل شبکه‌ی ژلی نسبت داد (Sagiri *et al.*, 2016). در مقایسه‌ی اولئوژل‌ها، نقطه‌ی اوج این بازه در اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید نسبت به مونوگلیسرید خالص، به اعداد موجی پایین‌تری منتقل شده بود که می‌توان به ظرفیت نگهداری روغن و سفتی بالای این اولئوژل نسبت داد. همچنین بیشترین کاهش در باند ۳۰۰۸ Cm^{-1} نیز در اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید مشاهده شد که احتمالا به‌دلیل شبکه‌ی متراکم این اولئوژل بود که موجب حفظ بهتر روغن (کاهش روغن آزاد) می‌شود (Li *et al.*, 2024). علاوه‌براین، باند مربوط به کشش گروه کربونیل در اولئوژل‌ها نسبت به اولئوژلاتورهای خالص به عدد موجی بالاتر (۱۷۴۵ Cm^{-1}) انتقال یافت که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی تقویت پیوند هیدروژنی باشد (Liu *et al.*, 2024). باندهای کشش متقارن و نامتقارن CH (۲۸۵۰ و ۲۹۱۹ Cm^{-1}) در اولئوژلاتورهای خالص به ۲۸۵۵ و ۲۹۲۵ Cm^{-1} در اولئوژل‌ها جابه‌جا شدند که به‌دلیل وجود برهم‌کنش‌های واندروالسی بود و باعث کاهش سیالیت زنجیره‌های آلکیل می‌شود (Ghan *et al.*, 2022). باروسو و همکاران (Barroso *et al.*, 2024) نیز این جابه‌جایی در باندهای کشش متقارن و نامتقارن CH را با برهم‌کنش‌های واندروالسی مرتبط دانستند. در انتها می‌توان نتیجه گرفت که تشکیل ژل در هر سه اولئوژل، صرفاً ناشی از برهم‌کنش‌های غیرکووالانسی مانند پیوند هیدروژنی و برهم‌کنش واندروالس بود که با مطالعات لوپی و همکاران (Lupi *et al.*, 2018) و بارتی و همکاران (Bharti *et al.*, 2021) مطابقت داشت.



شکل ۵- نمودارهای طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه‌ی اولئوژلاتورها و روغن (A) و اولئوژل‌ها (B)

S60: اسپن ۶۰، PGE: پلی‌گلیسرول‌استر، MGE: مونوگلیسرید، PO: روغن بادام‌زمینی، MG: اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید، PG: اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر، SG: اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰

Fig. 5. FTIR spectra of: (A) oleogelators and oil and (B) oleogels

S60: Span 60, PGE: Polyglycerol ester, MGE: Monoglyceride, PO: Peanut oil, MG: Monoglyceride-based oleogel, PG: Polyglycerol ester-based oleogel, SG: Span 60-based oleogel

عدد پراکسید

پایداری اکسیداتیو نمونه‌ها توسط عدد پراکسید (PV) ارزیابی شد که یک پارامتر مهم برای بررسی مقدار محصولات اولیه‌ی تولیدشده در اکسیداسیون لیپیدها است (Malvano *et al*., 2024). در جدول ۳ نتایج حاصل از اندازه‌گیری عدد پراکسید در دو روز یکم و سی‌ام، ارائه شده است. پس از اندازه‌گیری اعداد پراکسید در روز اول، همه‌ی نمونه‌ها به‌مدت ۳۰ روز در دمای°C ۲۵ نگهداری شدند و سپس مجددا عدد پراکسید آن‌ها اندازه‌گیری شد. روغن بادام‌زمینی پرس سرد به‌عنوان نمونه‌ی شاهد در نظر گرفته شد. در روز اول عدد پراکسید اولئوژل‌ها به‌دلیل دمای بالای استفاده‌شده برای تولید، بالاتر از روغن بادام‌زمینی پرس سرد بود (Badem & Baştürk, 2023). عدد پراکسید اولئوژل‌ها پس از ۳۰ روز بالاتر از نمونه‌ی شاهد بود که احتمالا به‌دلیل بالاتر بودن پراکسید آن‌ها در روز اول نسبت به نمونه‌ی شاهد بود. به‌همین دلیل برای بررسی تاثیر اولئوژلاسیون می‌توان از مقایسه‌ی اختلاف عدد پراکسید نمونه‌ها در روز ۱ و ۳۰ استفاده کرد. به‌طوری که این اختلاف برای نمونه‌ی شاهد و اولئوژل‌های بر پایه‌ی مونوگلیسرید، پلی گلیسرول‌استر و اسپن ۶۰ به‌ترتیب ۴/۶۵، ۳/۹۳، ۳/۶۷ و ۴/۴ بود. بنابراین نمونه‌ی شاهد دارای تندترین روند افزایشی بود که می‌توان به عدم وجود شبکه‌ی ژلی در آن نسبت داد (Soares, Okuro, da Silva, Goldbeck, & Cunha, 2025). شبکه‌ی سه‌بعدی تشکیل شده توسط اولئوژلاتورها در روغن به‌عنوان مانع فیزیکی عمل کرده و از حرکت عوامل اکسیدکننده در روغن جلوگیری می‌کند (Palla & Carrín, 2024). همچنین اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ نزدیکترین به نمونه‌ی شاهد بود. این نتایج با یافته‌های بخش خواص مکانیکی و مشاهدات میکروسکوپی مطابقت داشت. به‌طوری‌که اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ دارای ضعیف‌ترین بافت بود و همچنین بزرگ‌ترین و کم تراکم‌ترین کریستال‌ها را داشت. این ویژگی‌ها نمایانگر شبکه‌ی سه بعدی ضعیف و در نتیجه، اثر محافظی کمتر بود. همچنین سورفاکتانت‌های حاوی اسیدهای چرب غیراشباع مانند اسپن ۶۰ ممکن است حاوی پراکسیدهای باقی‌مانده از فرآیند تولید باشند که موجب پتانسیل بالای آن‌ها برای تخریب اکسیداتیو می‌شود (Hasenhuettl & Hartel, 2008). درحالی‌که اولئوژل‌های بر پایه‌ی مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول‌استر به‌دلیل تشکیل شبکه‌ی ژلی قوی روند کندتری در افزایش عدد پراکسید نشان دادند و با یکدیگر اختلاف معنی‌دار ($p<0.05$) نداشتند. بنابراین می‌توان گفت این دو اولئوژل توانستند مانع فیزیکی بهتری برای محافظت از روغن در برابر اثرات نور و اکسیژن در طول نگهداری باشند (Hafiz *et al*., 2025). چن و همکاران (Chen, Zhu, Tian, & Li, 2024) نیز پایین بودن عدد پراکسید اولئوژل‌های بر پایه‌ی گلیسرول مونولورات و دی‌استیل تارتاریک اسید مونودی گلیسرید را نسبت به اولئوژل‌های دیگر (تولیدشده از پروپیلن‌گلیکول-استر، مونوگلیسریدهای سوکسینیله، گلیسریل‌لاکتات استر، استرهای ساکارز، گلیسریل‌سیترات‌استر) به آرایش منظم و ساختار کریستالی

متراکم آن‌ها نسبت دادند. همچنین طبق یافته‌های کاپونیو و همکاران (Caponio *et al.*, 2011) امولسیفایرهای دارای OH آزاد (مانند مونوگلیسرید) در غلظت‌های بالای ۳ درصد با جذب اکسیژن توسط گروه‌های OH خود در سطح روغن که موجب عدم تماس اکسیژن با روغن می‌شود، به‌عنوان آنتی‌اکسیدان عمل می‌کنند. بررسی‌های این مطالعه گویای اثرگذاری مثبت اولئوژل‌ها بر پایداری اکسیداتیو روغن بود اما بالاتر بودن عدد پراکسید تمامی اولئوژل‌ها از نمونه‌ی شاهد نیاز به بهینه‌سازی روش تهیه‌ی اولئوژل را خاطرنشان می‌کند.

جدول ۳- مقادیر عدد پراکسید روغن بادام‌زمینی (PO) اولئوژل‌های بر پایه‌ی مونوگلیسرید (MG)، پلی‌گلیسرول‌استر (PG)، اسپن ٦٠ (SG)

Table 3- Peroxide values of peanut oil (PO) in oleogels based on monoglyceride (MG), polyglycerol ester (PG), and Span 60 (SG)

زمان Time (Day)	PO	MG	PG	SG
1	0.65 ± 0.05[c]	1.76 ±0.06[b]	1.67 ± 0.07[b]	2.08 ± 0.16[a]
30	5.3 ± 0.7[b]	5.69 ± 0.16[b]	5.34 ± 0.15[b]	6.48 ± 0.2[a]

*حروف مختلف نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار بین نمونه‌ها می‌باشد (آزمون دانکن، p<۰/۰۵).

*Different letters indicate significant differences between samples (Duncan's test, p<0.05).

ارزیابی سفتی کیک کره‌ای

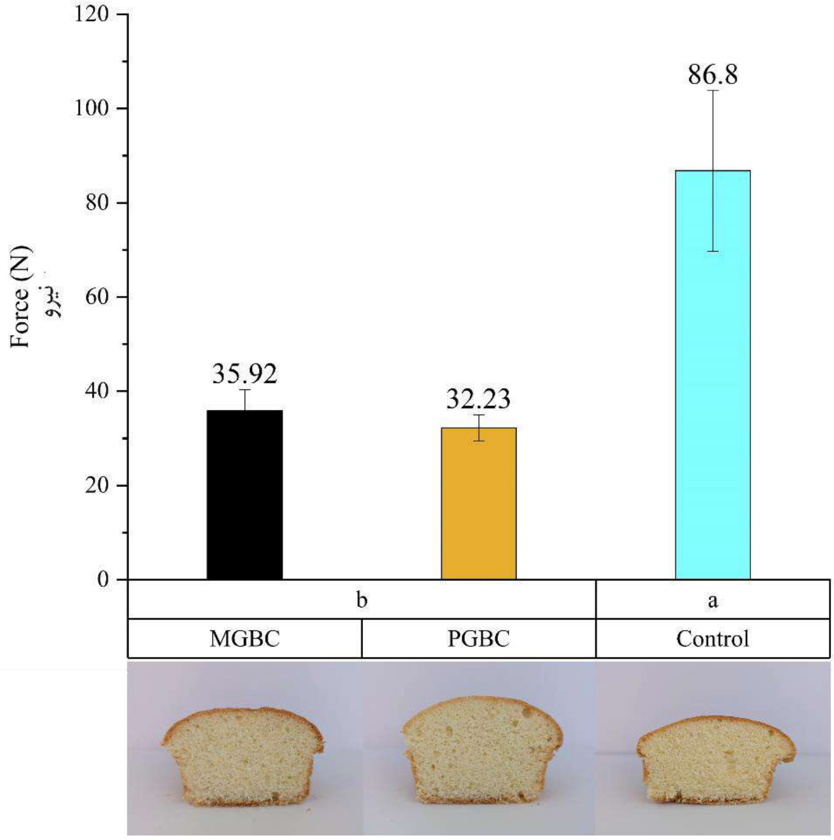
بافت کیک یک عامل مهم در کیفیت و پذیرش آن توسط مصرف‌کنندگان است (Chen *et al.*, 2023). برای بررسی تأثیر نوع اولئوژلاتور و همچنین جایگزینی کامل کره بر بافت کیک کره‌ای آزمون فشردن انجام شد و حداکثر نیرو در این آزمون به‌عنوان سفتی ثبت شد. طبق شکل ۶ کیک شاهد دارای بالاترین سفتی بود و اختلاف معنی‌دار (p<۰/۰۵) با دو نمونه‌ی دیگر داشت؛ زیرا کره به‌علت داشتن بخش جامد کمتر، موجب تولید خمیر با ویسکوزیته‌ی پایین‌تری شده و به‌دلیل ناتوانی در حفظ حباب‌های هوا باعث سفت‌تر شدن بافت کیک می‌شود (Fearon, 2011; Weeragul & Pandolsook, 2022). همچنین کیک‌های فرموله‌شده با اولئوژل به‌طور قابل توجهی نرم‌تر بودند که می‌توان به داشتن خاصیت امولسیفایری اولئوژلاتورها و سفتی اولئوژل های استفاده‌شده در فرمولاسیون نسبت داد. سفت‌تر بودن چربی باعث حفظ بیشتر حباب‌های هوا شده و باعث نرم‌تر شدن کیک می‌شود. به‌طوری‌که در مطالعه‌ی بادم و همکاران (Badem & Baştürk, 2023) نرم‌تر شدن بافت کیک فرموله‌شده با اولئوژل، با افزایش درصد موم به‌عنوان اولئوژلاتور (سفت‌تر شدن اولئوژل) مشاهده شد. همچنین کیک تولیدشده در مطالعه‌ی آلوارز-رامیرز و همکاران (Alvarez-Ramirez, Vernon-Carter, Carrera-Tarela, Garcia, & Roldan-Cruz, 2020) به‌دلیل جایگزین کردن کامل کره با اولئوژل بر پایه‌ی موم کاندلیلا، بافت نرم‌تری داشت. ازسوی‌دیگر به‌دلیل اینکه مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول‌استر امولسیفایر هستند، می‌توانند به‌طور مؤثری حباب‌های هوای بیشتری را در طول فرآیند هم‌زدن به خمیرها وارد کنند و از این طریق نیز باعث نرمی بافت کیک شوند (Chen *et al.*, 2023). در مقایسه‌ی کیک‌های تهیه‌شده با اولئوژل‌ها، طبق شکل ۶، MGBC بافت سفت‌تری دارد که احتمالا بتوان به سفت بودن بیش‌ازحد اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید نسبت داد؛ به‌طوری‌که موجب کاهش عملکرد همزن برقی به‌دلیل سفتی زیاد خمیر شد. این یافته‌ها با تصاویر کیک‌ها در شکل ۶ نیز مطابقت داشت؛ به‌طوری‌که طبق تصاویر، MGBC با بالاترین و نمونه‌ی شاهد با پایین‌ترین تخلخل و ارتفاع، نرم‌ترین و سفت‌ترین بافت را داشتند. در نهایت می‌توان گفت این آزمون فقط اطلاعاتی در مورد سفتی کیک‌ها می‌دهد و برای بررسی دقیق‌تر بافت کیک‌ها می‌توان با استفاده از آزمون بافت‌سنجی[1] (TPA) پارامترهای بافتی بیشتری مانند قابلیت جویدن[2]، پیوستگی[3]، قابلیت ارتجاع[4] و ... را ارزیابی کرد.

ارزیابی حسی کیک کره‌ای

پذیرش مصرف‌کننده برای تعیین کیفیت یک محصول حائز اهمیت است (Zarzycki *et al.*, 2022). میانگین نتایج پارامترهای حسی (رنگ، طعم، بافت و پذیرش کلی) برای کیک‌های کره‌ای حاوی اولئوژل و کره (به‌عنوان شاهد) در شکل ۷ ارائه شده است. در پارامتر بافت هر دو کیک تهیه‌شده از اولئوژل امتیاز بالاتری از کیک شاهد گرفتند که با نتایج آزمون فشردن مطابقت داشت و هر دو نرم‌تر از کیک شاهد بودند. سو و همکاران (Su *et al.*, 2023) نیز در مطالعه‌ی خود که در مورد جایگزین کردن کامل کره با پیکرینگ امولسیون تولیدشده از اووآلبومین-فرولیک اسید-کاراگینان در فرمولاسیون نان بود؛ گزارش دادند که نان دارای پیکرینگ امولسیون در پارامتر بافت، امتیاز بالاتری از نمونه‌ی شاهد گرفت و دلیل آن را به نرم‌تر بودن این نان نسبت

1- Texture profile analysis
2- Chewiness
3- Cohesiveness
4- Springiness

دادند. از لحاظ طعم نیز این نتیجه تکرار شد و کیک شاهد پایین‌ترین امتیاز را گرفت. به‌دلیل جایگزینی کامل اولئوژل با کره در فرمولاسیون کیک و همچنین استفاده از روغن پرس سرد بادام‌زمینی در فرمولاسیون اولئوژل‌ها، ممکن است دریافت امتیاز پایین کیک شاهد ناشی از ذائقه یا علاقه‌ی ارزیاب‌ها باشد؛ به‌طوری‌که طعم بادام‌زمینی را به کره ترجیح دادند. بنابراین استفاده از ارزیاب‌های تخصصی و ارزیابی توصیفی در کنار هدونیک می‌تواند راه‌گشا باشد. در انتها PGBC بالاترین امتیاز را در پارامتر پذیرش کلی و رنگ به خود اختصاص داد. همچنین MGBC و کیک شاهد امتیاز یکسانی را در پذیرش کلی کسب کردند. بنابراین می‌توان گفت اولئوژل‌های بر پایه‌ی مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول‌استر، می‌توانند به‌عنوان جایگزین کامل کره در فرمولاسیون کیک کره‌ای مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ٦- شکل ظاهری و مقادیر سفتی کیک‌های کره‌ای

حروف متفاوت نشان‌دهنده‌ی وجود اختلاف معنی‌دار بین داده‌ها است ($p<0.05$).

Control: کیک کره‌ای تهیه‌شده با کره، MGBC: کیک کره‌ای تهیه‌شده با اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید، PGBC: کیک کره‌ای تهیه‌شده با اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر

Fig. 6. Visual appearance and firmness values of butter cakes

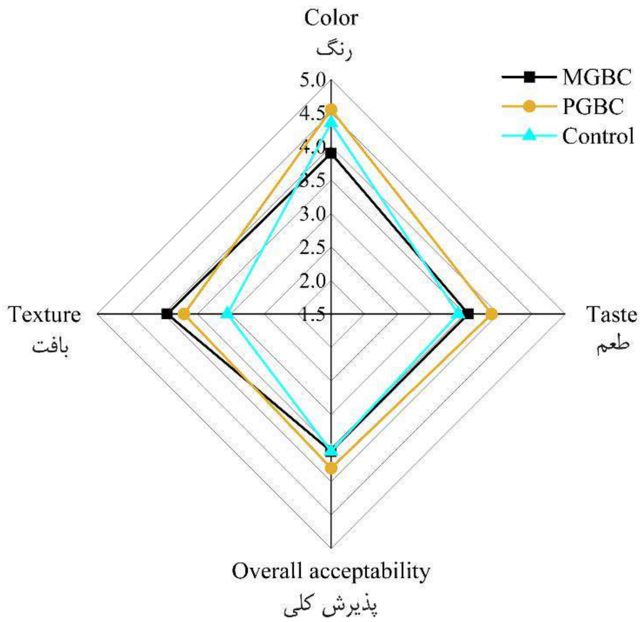
Different letters indicate significant differences between the data ($p<0.05$).

Butter cake prepared using butter (Control), monoglyceride based oleogel (MGBC), polyglycerol ester based oleogel (PGBC)

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، نوع اولئوژلاتور تأثیر به‌سزایی بر خصوصیات فیزیکی-شیمیایی و ساختاری اولئوژل‌ها داشت. اولئوژل تهیه‌شده با مونوگلیسرید بالاترین ظرفیت نگهداری روغن، بیشترین پایداری حرارتی و سفت‌ترین بافت را از خود نشان داد. اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر نیز عملکرد مطلوبی داشت، ولی اولئوژل بر پایه‌ی اسپن ۶۰ پتانسیل بالایی برای استفاده به‌عنوان جایگزین چربی نشان نداد. تغییرات مشاهده‌شده در طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه، وجود برهم‌کنش‌های غیر کووالانسی را در تشکیل ژل تأیید کرد. تصاویر میکروسکوپی نیز تفاوت در ریزساختار کریستال‌ها را نشان داد و ثابت کرد که خواص ماکروسکوپی اولئوژل‌ها تا حد زیادی به نوع و شکل کریستال آن‌ها بستگی دارد. تمامی اولئوژل‌ها در مقایسه با روغن خالص، افزایش آهسته‌تری در عدد پراکسید طی ۳۰ روز نگهداری نشان دادند. مهم‌تر از همه، استفاده از این اولئوژل‌ها در کیک کره‌ای نشان داد که نمونه‌های حاوی اولئوژل‌های مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول‌استر، به‌ترتیب امتیاز پذیرش کلی برابر و حتی بالاتر از نمونه‌ی شاهد (کیک

حاوی کره) کسب کردند و همچنین بافت آن‌ها نرم‌تر بود. بنابراین، یافته‌های این مطالعه به‌روشنی پتانسیل بالای اولئوژل‌های بر پایه‌ی مونوگلیسرید و پلی‌گلیسرول‌استر را برای جایگزینی کامل کره در فرمولاسیون کیک‌های کره‌ای، با حفظ یا بهبود ویژگی‌های کیفی محصول نهایی، ضمن کاهش اسیدهای چرب اشباع و ترانس، اثبات می‌کند.



شکل ۷- پارامترهای ارزیابی حسی کیک‌های کره‌ای

Control: کیک کره‌ای تهیه‌شده با کره، MGBC: کیک کره‌ای تهیه‌شده با اولئوژل بر پایه‌ی مونوگلیسرید، PGBC: کیک کره‌ای تهیه‌شده با اولئوژل بر پایه‌ی پلی‌گلیسرول‌استر

Fig. 7. Sensory evaluation parameters of butter cakes

Butter cake prepared using butter (Control), monoglyceride based oleogel (MGBC), polyglycerol ester based oleogel (PGBC)

با وجود نتایج امیدوارکننده، این پژوهش با محدودیت‌هایی مواجه بود که زمینه را برای تحقیقات آتی فراهم می‌آورد. دامنه‌ی مطالعه به یک نوع روغن (بادام‌زمینی پرس سرد) و سه نوع امولسیفایر در یک غلظت مشخص (۱۲ درصد) محدود بود. علاوه‌براین، ارزیابی خواص بافتی و حسی می‌توانست کامل‌تر باشد؛ به‌عنوان مثال، استفاده از آزمون‌های رئولوژیکی برای اولئوژل‌ها و آنالیز پروفایل بافت (TPA) برای کیک، درک عمیق‌تری از خواص مکانیکی ارائه می‌داد و بهره‌گیری از پنل‌های تخصصی‌تر و ارزیابی توصیفی، به اعتبارسنجی دقیق‌تر نتایج کمک می‌نمود. از دیگر محدودیت‌ها، نیاز به بهینه‌سازی فرآیند تولید برای به حداقل رساندن اکسیداسیون بود که در نتایج اندازه گیری عدد پراکسید مشهود بود. همچنین، پایداری بلندمدت کیک‌های نهایی از نظر بیاتی و حفظ ویژگی‌های حسی در طول دوره‌ی نگهداری بررسی نشد. در نهایت، پیشنهاد می‌شود برای پژوهش‌های آتی، عملکرد این اولئوژل‌ها به‌عنوان جایگزین چربی در سایر فراورده‌های نانوایی و همچنین کره‌ی بادام‌زمینی نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

میزان مشارکت نویسندگان

نجیبی حسینی: مدیریت داده‌ها، تحقیق و بررسی، نرم‌افزار، نوشتن- پیش‌نویس اصلی، **قنبرزاده:** مفهوم‌سازی، تأمین مالی، مدیریت پروژه، نظارت، منابع، نوشتن- بررسی و ویرایش.

منابع تأمین مالی

این تحقیق هیچ کمک مالی خاصی از سازمان‌های تأمین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیر انتفاعی دریافت نکرد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از آزمایشگاه بیوفیزیک و مهندسی مواد غذایی صمیمانه قدردانی می‌کنم و بر خود واجب می‌دانم تا از دوستان گران‌قدرم، آقایان حامد حسن‌زاده، دیده‌ور، روشن‌دوست، رادخواه و فرهنگ، همچنین خانم‌ها نیر کریمی، علمی، باقری، نوینی، آذری و خداپرست صمیمانه سپاسگزاری نمایم.

References

1. Alvarez-Ramirez, J., Vernon-Carter, E., Carrera-Tarela, Y., Garcia, A., & Roldan-Cruz, C. (2020). Effects of candelilla wax/canola oil oleogel on the rheology, texture, thermal properties and in vitro starch digestibility of wheat sponge cake bread. *LWT-Food Science and Technology*, 109701, 130. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109701
2. Amoah, C., Lim, J., Jeong, S., & Lee, S. (2017). Assessing the effectiveness of wax-based sunflower oil oleogels in cakes as a shortening replacer. *LWT-Food Science and Technology, 86*, 430–437. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.021
3. Ang, E.M., Abdullah, N., Muhammad, N., & Lizardo, R.C.M. (2017). Effect of formulation with papaya sauce as fat replacer on butter cake texture. *Journal of Science and Technology, 9*(4).
4. Arrieira, N.M., de Ávila, M.T., Flores, W.H., Michelon, M., Duarte, S.H., & Burkert, J.F.D.M. (2025). Oleogels based on carotenoid-rich microbial oil produced by *R. mucilaginosa* in agro-industrial by-products. *Bioprocess and Biosystems Engineering, 48*(2), 275–286. https://doi.org/10.1007/s00449-024-03108-y
5. Badem, Ş., & Baştürk, A. (2023). Oxidative stability and characterization of oleogels obtained from safflower oil-based beeswax and rice bran wax and their effect on the quality of cake samples. *Journal of the American Oil Chemists' Society, 100*(8), 635–649. https://doi.org/10.1002/aocs.12694
6. Banerjee, D., Sengupta, S., Sahu, D., Ghosh, S., Neelapu, B.C., Mitra, A.K., Sarkar, P., Dutta, D., Demina, T.S., Pal, K. (2025). Optical and structural modifications in stearyl alcohol oleogels induced by soylecithin. *Crystal Growth & Design, 25*(7), 2043–2055. https://doi.org/10.1021/acs.cgd.4c01638
7. Barroso, N.G., Okuro, P.K., Cerqueira, M.Â.P.R., & Cunha, R.L. (2024). Unveiling the formation capacity of multicomponent oleogels :Performance of lecithin interacting with monostearate derivatives. *Food Research International, 187*, 114430. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114430
8. Behera, B., Patil, V., Sagiri, S., Pal, K., & Ray, S. (2012). Span-60-based organogels as probable matrices for transdermal/topical delivery systems. *Journal of Applied Polymer Science, 125*(2), 852–863. https://doi.org/10.1002/app.35674
9. Bharti, D., Kim, D., Cerqueira, M.A., Mohanty, B., Habibullah, S., Banerjee, I., & Pal, K. (2021). Effect of biodegradable hydrophilic and hydrophobic emulsifiers on the oleogels containing sunflower wax and sunflower oil. *Gels, 7*(3), 133. https://doi.org/10.3390/gels7030133
10. Bublin, M., & Breiteneder, H. (2014). Cross-reactivity of peanut allergens. *Current Allergy and Asthma Reports, 14*, 1–12. https://doi.org/10.1007/s11882-014-0426-8
11. Buitimea-Cantúa, N., Serna-Saldívar, S., Pérez-Carrillo, E., Jordânia-Silva, T., Barrera-Arrellano, D., & Buitimea-Cantúa, G. (2022). Textural and rheological properties of soybean oil organogels structured with polyglycerol and propylene glycol esters during storage. *Grasas y Aceites, 73*(1), e443–e443. https://doi.org/10.3989/gya.1001202
12. Caponio, F., Paradiso, V., Bruno ,G., Summo, C., Pasqualone, A., & Gomes, T. (2011). Do monoacylglycerols act as pro-oxidants in purified soybean oil? Evidence of a dose-dependent effect. *Italian Journal of Food Science, 23*(3), 239. https://doi.org/10.1021/jf5025888
13. Cerqueira, M.A., Fasolin, L.H., Picone, C.S., Pastrana, L.M., Cunha, R.L., & Vicente, A.A. (2017). Structural and mechanical properties of organogels: Role of oil and gelator molecular structure. *Food Research International, 96*, 161–170. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.03.021
14. Chen, X., Ding, S., Chen, Y., Lan, D., Wang, W., & Wang, Y. (2023). Assessing the effectiveness of peanut diacylglycerol oil-ethylcellulose/monoglyceride-based oleogel in sponge cake as a margarine replacer. *Food Bioscience, 55*, 102959. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102959
15. Chen, X., Zhu, J., Tian, D., & Li, Z. (2024). Preparation of soybean protein isolate–ester emulsifier oleogels and comparative study of their structure and properties. *Food Chemistry, 461*, 140927. https://doi.org/10. 1016/j.foodchem.2024.140927
16. Davidovich-Pinhas, M., Barbut, S., & Marangoni, A. (2015). The role of surfactants on ethylcellulose oleogel structure and mechanical properties. *Carbohydrate Polymers, 127*, 355-362. https://doi.org/10.1016/j. carbpol.2015.03.085
17. de Oliveira, G.M., Stahl, M.A., Ribeiro, A.P.B., Grimaldi, R., Cardoso, L.P., & Kieckbusch, T.G. (2015). Development of zero trans/low sat fat systems structured with sorbitan monostearate and fully hydrogenated canola oil. *European Journal of Lipid Science and Technology, 117*(11), 1762–1771. https://doi.org/10.1002/ ejlt.201400559
18. Demirkesen, I., & Mert, B. (2020). Recent developments of oleogel utilizations in bakery products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 60*(14), 2460–2479. https://doi.org/10.1080/10408398.2019. 1649243
19. Dimakopoulou-Papazoglou, D., Giannakaki, F., & Katsanidis, E. (2023). Structural and physical characteristics of mixed-component oleogels: Natural wax and monoglyceride interactions in different edible oils. *Gels, 9*(8), 627. https://doi.org/10.3390/gels9080627

20. Dominguez, M., Carrin, M.E., & Palla, C.A. (2024). Structuring PUFA-rich oils with monoglycerides: Physicochemical and nutritional properties of fat substitutes with high-lipid quality. *Food Bioscience, 60*, 104107. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104107
21. Dun, Q., Yao, L., Deng, Z., Li, H., Li, J., Fan, Y., & Zhang, B. (2019). Effects of hot and cold-pressed processes on volatile compounds of peanut oil and corresponding analysis of characteristic flavor components. *LWT-Food Science and Technology, 112*, 107648. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.084
22. Fasolin, L.H., Cerqueira, M., Pastrana, L., Vicente, A., & Cunha, R. (2018). Thermodynamic, rheological and structural properties of edible oils structured with LMOGs: Influence of gelator and oil phase. *Food Structure, 16*, 50–58. https://doi.org/10.1016/j.foostr.2018.03.003
23. Fearon, A.M. (2011). Butter and butter products. *Dairy Ingredients for Food Processing*, 199–223. https://doi.org/10.1002/9780470959169.ch9
24. Feng, Z., He, D., Zhang, L., Li, Q., Xue, C., Yi, X., Liao, L., Pei, Z., & Shen, X. (2025). Preparation of myofibrillar protein oleogels by emulsion template method: Application of fat substitute for sponge cakes. *LWT-Food Science and Technology, 216*, 117350. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117350
25. Gao, Z., Zhang, C., Wu, Y., Chen, F., Hu, B., Wang, R., Yang, J., & Nishinari, K. (2022). Composite oleogels formed by cellulose particles and sorbitan acid esters. *Food Structure, 31*, 100242. https://doi.org/10.1016/j.foostr.2021.100242
26. Ghan, S.Y., Siow, L.F., Tan, C.P., Cheong, K.W., & Thoo, Y.Y. (2020). Influence of soya lecithin, sorbitan and glyceryl monostearate on physicochemical properties of organogels. *Food Biophysics, 15*(3), 386–395. https://doi.org/10.1007/s11483-020-09633-z
27. Ghan, S.Y., Siow, L.F., Tan, C.P., Cheong, K.W., & Thoo, Y.Y. (2022). Palm olein organogelation using mixtures of soy lecithin and glyceryl monostearate. *Gels, 8*(1), 30. https://doi.org/10.3390/gels8010030
28. Giacomozzi, A.S., Carrín, M.E., & Palla, C.A. (2018). Muffins elaborated with optimized monoglycerides oleogels: From solid fat replacer obtention to product quality evaluation. *Journal of Food Science, 83*(6), 1505–1515. https://doi.org/10.1111/1750-3841.14174
29. Giacomozzi, A.S., Carrín, M.E., & Palla, C.A. (2023). Muffins made with monoglyceride oleogels: Impact of fat replacement on sensory properties and fatty acid profile. *Journal of the American Oil Chemists' Society, 100*(4), 343–349. https://doi.org/10.1002/aocs.12674
30. Giacomozzi, A.S., Palla, C.A., Carrín, M.E., & Martini, S. (2019). Physical properties of monoglycerides oleogels modified by concentration, cooling rate, and high-intensity ultrasound. *Journal of Food Science, 84*(9), 2549–2561. https://doi.org/10.1111/1750-3841.14762
31. Güneşer, B.A., Yılmaz, E., & Ok, S. (2017). Cold pressed versus refined winterized corn oils: quality, composition and aroma. *Grasas y Aceites, 68*(2), e194–e194. https://doi.org/10.3989/gya.1168162
32. Hafiz, S., Sadeghizadeh-Yazdi, J., Eskandari, S., Morokian, R., Akramzade, N., & Madadizadeh, F. (2025). Physicochemical, rheological, sensory properties and shelf life of processed cheese analogue prepared with oleogel sesame oil and mono-and di-glyceride (E471). *Food Chemistry, 470*, 142467. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142467
33. Hasenhuettl, G.L., & Hartel, R.W. (2008). *Food emulsifiers and their applications* (Vol. 19): Springer.
34. Hwang, H.S., Kim, S., Winkler-Moser, J.K., Lee, S., & Liu, S.X. (2022). Feasibility of hemp seed oil oleogels structured with natural wax as solid fat replacement in margarine. *Journal of the American Oil Chemists' Society, 99*(11), 1055–1070. https://doi.org/10.1002/aocs.12619
35. Jang, A., Bae, W., Hwang, H.-S., Lee, H.G., & Lee, S. (2015). Evaluation of canola oil oleogels with candelilla wax as an alternative to shortening in baked goods. *Food Chemistry, 187*, 525–529. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.110
36. Lee, S. (2018). Utilization of foam structured hydroxypropyl methylcellulose for oleogels and their application as a solid fat replacer in muffins. *Food Hydrocolloids, 77*, 796–802. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.11.022
37. Li, J., Guo, R., Bi, Y., Zhang, H., & Xu, X. (2021). Comprehensive evaluation of saturated monoglycerides for the forming of oleogels. *LWT-Food Science and Technology, 151*, 112061. In Press. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112061
38. Li, J., Xiao, Y., Guo, R., Bi, Y., Zhang, H., & Xu, X. (2024). Enhancing the long-term stability of glyceryl monostearate-based oleogels by incorporating hydroxy monoglyceride as an additional scaffolding agent. *LWT-Food Science and Technology, 214*, 117154. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117154
39. Liu, P., Pei ,H., Shen, J., Xu, C., & Zhao, H. (2024). Effect of surfactin on the properties of glycerol monosterate–Based oleogels. *Food Structure, 40*, 100370. https://doi.org/10.1016/j.foostr.2024.100370
40. Lupi, F., Mancina, V., Baldino, N., Parisi, O., Scrivano, L., & Gabriele, D. (2018). Effect of the monostearate/monopalmitate ratio on the oral release of active agents from monoacylglycerol organogels. *Food & Function, 9*(6), 3278–3290. https://doi.org/10.1039/C8FO00594J

41. Malvano, F., Albanese, D., Cinquanta, L., Liparoti, S., & Marra, F. (2024). A comparative study between beeswax and glycerol monostearate for food-grade oleogels. *Gels*, *10*(4), 214. https://doi.org/10.3390/gels10040214
42. Malvano, F., Laudisio, M., Albanese, D., d'Amore, M., & Marra, F. (2022). Olive oil-based oleogel as fat replacer in a sponge cake: A comparative study and optimization. *Foods*, *11*(17), 2643. https://doi.org/10.3390/foods11172643
43. Meng, Z., Guo, Y., Wang, Y., & Liu, Y. (2019). Organogels based on the polyglyceryl fatty acid ester and sunflower oil: Macroscopic property, microstructure, interaction force, and application. *LWT-Food Science and Technology, 116*, 108590. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108590
44. Meng, X., Wang, H., Lu, Y., Yu, N., & Ye, Q. (2024). The gelation characteristics of Torreya grandis wax in diacylglycerol and its preparation of oleogel substitution for shortening. *International Journal of Biological Macromolecules*, *271*, 132592. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132592
45. Monto, A.R., Yuan, L., Xiong, Z., Shi, T., Li, M., Wang, X., Jin, W., Li, J., Gao, R. (2023). α-tocopherol stabilization by soybean oil and glyceryl monostearate made oleogel: Dynamic changes and characterization for food application. *LWT-Food Science and Technology*, *187*, 115325. https://doi.org/10.1016/j.lwt. 2023.115325
46. Nguyen Doan Mai, H., Phan Thi Lan, K., Techapun, C., Leksawasdi, N., Taesuwan, S., Hanprom, N., & Khemacheewakul, J. (2023). Quality evaluation of butter cake prepared by substitution of wheat flour with green soybean (*Glycine max* L.) okara. *Journal of Culinary Science & Technology*, *21*(4), 606–619. https://doi.org/10.1080/15428052.2021.1978363
47. Palla, C., & Carrín, M.E. (2024). Monoglyceride Oleogels. In *Advances in Oleogel Development, Characterization, and Nutritional Aspects* (pp. 115–131): Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46831-5_5
48. Palla, C., Dominguez, M., & Carrín, M. (2022). An overview of structure engineering to tailor the functionality of monoglyceride oleogels. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *21*, 2587–2614. In Press. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12930
49. Pancharoen, S., Leelawat, B., & Vattanakul, S. (2019). Using texture properties for clustering butter cake from various ratios of ingredient combination. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *13*, 34–42. https://doi.org/10.1007/s11694-018-9916-z
50. Prodromidis, P., Biliaderis, C.G., Katsanidis, E., & Moschakis, T. (2023). Effect of tween 20 on structure, phase-transition behavior and mechanical properties of monoglyceride oleogels. *Food Structure*, *38*, 100345. https://doi.org/10.1016/j.foostr.2023.100345
51. Sagiri, S.S ,.Kasiviswanathan, U., Shaw, G.S., Singh, M., Anis, A., & Pal, K. (2016). Effect of sorbitan monostearate concentration on the thermal, mechanical and drug release properties of oleogels. *Korean Journal of Chemical Engineering*, *33*, 1720–1727. https://doi.org/10.1007/s11814-015-0295-4
52. Silva, R.C.D., Ferdaus, M.J., Foguel, A., & da Silva, T.L.T. (2023). Oleogels as a fat substitute in food: A current review. *Gels*, *9*(3), 180. https://doi.org/10.3390/gels9030180
53. Singh, V.K., Pramanik, K., Ray, S.S., & Pal, K. (2015). Development and characterization of sorbitan monostearate and sesame oil-based organogels for topical delivery of antimicrobials. *Aaps Pharmscitech*, *16*, 293–305. https://doi.org/10.1208/s12249-014-0223-7
54. Soares, M.G., Okuro, P.K., da Silva, M.F., Goldbeck, R., & Cunha, R.L. (2025). Ultra-long-chain sorbitol esters tailoring thermo-responsive rheological properties of oleogels. *Foods*, *14*(6), 1030.
55. Su, T., Zhang, E., Yang, Y., Zheng, T., Xin, T., Dong, L., Huang, F., & Su, D. (2023). Utilization of ovalbumin-ferulic acid-carrageenan Pickering emulsion in baked bread for butter reduction: Bread microstructural properties and quality. *LWT-Food Science and Technology*, *185*, 115124. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115124
56. Sun, H., Xu, J., Lu, X., Xu, Y., Regenstein, J. M., Zhang, Y., & Wang, F. (2022). Development and characterization of monoglyceride oleogels prepared with crude and refined walnut oil. *LWT-Food Science and Technology*, *154*, 112769. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112769
57. Swe, M.T.H., & Asavapichayont, P. (2018). Effect of silicone oil on the microstructure, gelation and rheological properties of sorbitan monostearate–sesame oil oleogels. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, *13*(5), 485–497. https://doi.org/10.1016/j.ajps.2018.04.006
58. Trujillo-Ramírez, D., Lobato-Calleros, C., Vernon-Carter, E.J., & Alvarez-Ramirez, J. (2019). Cooling rate, sorbitan and glyceryl monostearate gelators elicit different microstructural, viscoelastic and textural properties in chia seed oleogels. *Food Research International*, *119*, 829–838. https://doi.org/10. 1016/j.foodres.2018.10.066
59. Uslu, E.K., & Yılmaz, E. (2021). Preparation and characterization of oleogels with tallow and partially hydrolyzed tallow as organogelators. *Grasas y Aceites*, *72*(1), e388–e388. https://doi.org/10.3989/gya. 1031192
60. Uvanesh, K., Sagiri, S., Senthilguru, K., Pramanik, K., Banerjee, I,. Anis, A., Al-Zahrani, S., & Pal, K. (2016). Effect of Span 60 on the microstructure, crystallization kinetics, and mechanical properties of stearic acid Oleogels: An in-depth analysis. *Journal of Food Science*, *81*(2), E380–E387. https://doi.org/10.1111/1750-3841.13170

61. Wang, Z., Chandrapala, J., Truong, T., & Farahnaky, A. (2023). Oleogels prepared with low molecular weight gelators: Texture, rheology and sensory properties, a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 63*(23), 6069–6113. https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2027339
62. Weeragul, K., & Pandolsook, S. (2022). Effects of manufacturing conditions on physical characteristics of recombined butter and quality of butter and sponge cakes. *Journal of Culinary Science & Technology, 20*(3), 197–212. https://doi.org/10.1080/15428052.2020.1824831
63. Wei, X., Xia, R., Wei, C., Shang, L., An, J., & Deng, L. (2024). The impact of beeswax and glycerol monolaurate on camellia oil oleogel's formulation and application in food products. *Molecules, 29*(13), 3192. https://doi.org/10.3390/molecules29133192
64. Yılmaz, E., & Öz, C. (2024). Utilization of hazelnut oil oleogels for the preparation of milk couverture type compound chocolates: Composition, properties, and sensory evaluations. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, *101*(12), 1401–1416. https://doi.org/10.1002/aocs.12850
65. Yilmaz, E., & Uslu, E.K. (2020). Comparison of the glycerol monostearate and polyglycerol stearate oleogels: Effects of amphiphile addition. *Authorea Preprints.* https://doi.org/10.22541/au.158775697. 74846507
66. Yin, W.-t., Maradza, W., Xu, Y.-f., Ma, X.-t., Shi, R., Zhao, R.-y., & Wang, X.-d. (2022). Comparison of key aroma-active composition and aroma perception of cold-pressed and roasted peanut oils. *International Journal of Food Science and Technology, 57*(5), 2968–2979. https://doi.org/10.1111/ijfs.15615
67. Zarzycki, P., Wirkijowska, A., Nawrocka, A., Kozłowicz, K., Krajewska, M., Kłosok, K., & Krawęcka, A. (2022). Effect of Moldavian dragonhead seed residue on the baking properties of wheat flour and bread quality. *LWT-Food Science and Technology, 155*, 112967. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112967
68. Zhang, Y., Xu, J., Tang, C., & Li, Y. (2023). Crystallization behavior and physical properties of monoglycerides-based oleogels as function of oleogelator concentration. *Foods, 12*(2), 345. https://doi.org/10.3390/foods12020345
69. Zhao, S., Zhu, Y., Zhang, L., Hu, F., Xu, W., Zheng, M., Zhou, Y., Li, S. (2025). The structuring mechanism and in vitro digestion of novel EPA-rich medium-and long-chain triacylglycerol oleogels. *LWT-Food Science and Technology, 215*, 117299. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117299
70. Zulfiqar, A., Shabbir, M.A., Tahir, F., Khan, M.R., Ahmed, W., Yıkmış, S., Manzoor, M., Abdi, G., Aadil, R .M. (2024). Development of oleogel by structuring the blend of corn oil and sunflower oil with beeswax to replace margarine in cookies. *Food Chemistry: X, 23*, 101676. https://doi.org/10.1016/j.fochx. 2024.101676